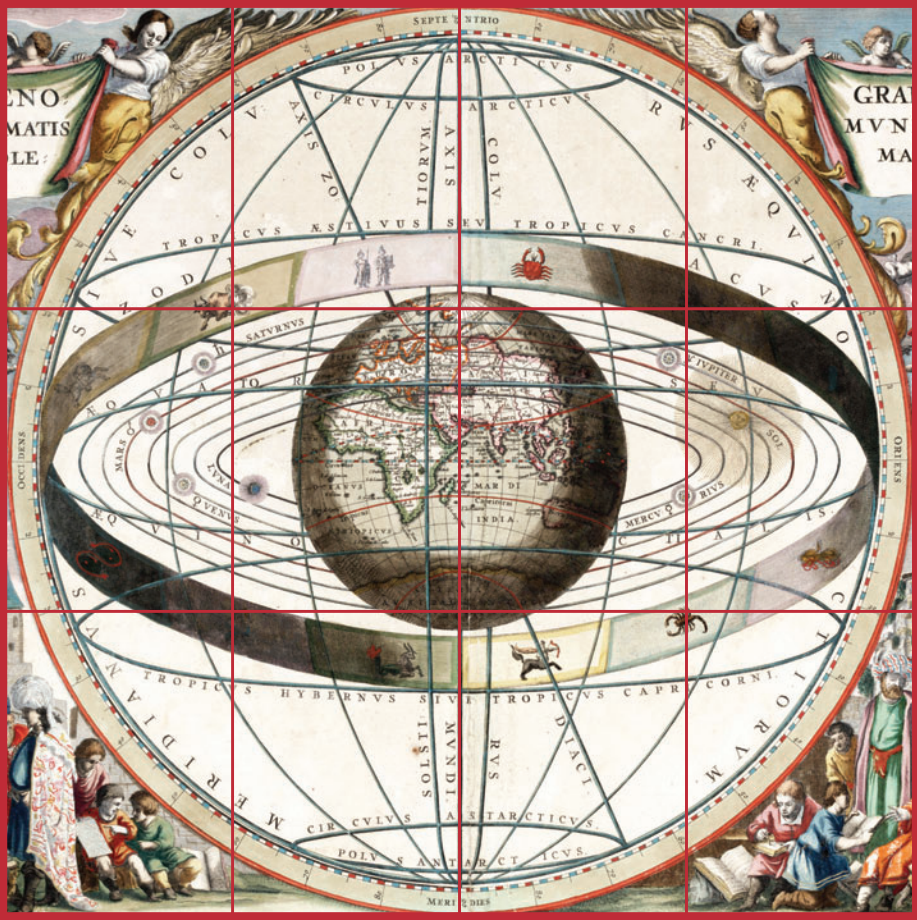
COSMOLOGÍA

Dr. Alejandro Gangui



Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Revista Descargada Gratis de
http://simpleyparatodos.blogspot.mx/
Suscribirte a nuestro Blog y asi Ayudanos a crecer.

COSMOLOGÍA

Dr. Alejandro Gangui

ADVERTENCIA

La habilitación de las direcciones electrónicas y dominios de la web asociados, citados en este libro, debe ser considerada vigente para su acceso, a la fecha de edición de la presente publicación. Los eventuales cambios, en razón de la caducidad, transferencia de dominio, modificaciones y/o alteraciones de contenidos y su uso para otros propósitos, queda fuera de las previsiones de la presente edición -Por lo tanto, las direcciones electrónicas mencionadas en este libro, deben ser descartadas o consideradas, en este contexto-.

Distribución de carácter gratuito.

autoridades

Presidente de la Nación
Dra. Cristina Fernández de Kirchner

Ministro de Educación
Dr. Alberto E. Sileoni

Secretaria de Educación
Prof. María Inés Abrile de Vollmer

Directora Ejecutiva del Instituto Nacional de Educación Tecnológica
Lic. María Rosa Almandoz

Director Nacional del Centro Nacional de Educación Tecnológica
Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Director Nacional de Educación Técnico Profesional y Ocupacional
Ing. Roberto Díaz

Ministerio de Educación.
Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
Saavedra 789. C1229ACE.
Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
República Argentina.
2009

COSMOLOGÍA

Dr. Alejandro Gangui

Colección: LAS CIENCIAS NATURALES Y LA MATEMÁTICA

Colección “Las Ciencias Naturales y la Matemática”.
Director de la Colección: Juan Manuel Kirschenbaum
Coordinadora general de la Colección: Haydeé Noceti.

Queda hecho el depósito que previene la ley N° 11.723. © Todos los derechos reservados por el Ministerio de Educación - Instituto Nacional de Educación Tecnológica.

La reproducción total o parcial, en forma idéntica o modificada por cualquier medio mecánico o electrónico incluyendo fotocopia, grabación o cualquier sistema de almacenamiento y recuperación de información no autorizada en forma expresa por el editor, viola derechos reservados.

Industria Argentina

ISBN 978-950-00-0709-2

Director de la Colección:
Lic. Juan Manuel Kirschenbaum

Coordinadora general y académica de la Colección:
Prof. Ing. Haydeé Noceti

Diseño didáctico y corrección de estilo:
Lic. María Inés Narvaja
Ing. Alejandra Santos

Coordinación y producción gráfica:
Tomás Ahumada

Diseño gráfico:
María Victoria Bardini

Ilustraciones:
Diego Gonzalo Ferreyro

Retoques fotográficos:
Roberto Sobrado

Diseño de tapa:
Tomás Ahumada

Administración:
Cristina Caratozzolo
Néstor Hergenrether

Nuestro agradecimiento al personal del Centro Nacional de Educación Tecnológica por su colaboración.

Gangui, Alejandro
Cosmología / Alejandro Gangui; dirigido por Juan Manuel Kirschenbaum.
- 1a ed. - Buenos Aires: Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica, 2009.
172 p. ; 24x19 cm. (Las ciencias naturales y la matemática)

ISBN 978-950-00-0709-2

1. Cosmología.
2. Enseñanza Secundaria.
I. Kirschenbaum, Juan Manuel, dir.
II. Título

CDD 113.071 2

Fecha de catalogación: 17/07/2009

Impreso en Anselmo L. Morvillo S. A., Av. Francisco Pienovi 317 (B1868DRG), Avellaneda, Pcia. de Buenos Aires, Argentina.

Tirada de esta edición: 100.000 ejemplares

Dr. Alejandro Gangui

El Autor

Alejandro Gangui es Doctor en Astrofísica e Investigador del Conicet en temas de cosmología en el IAFE - Instituto de Astronomía y Física del Espacio. Es también Profesor de la Facultad de Ciencias Exactas y Naturales de la Universidad de Buenos Aires. Se doctoró en Italia, más precisamente en Trieste, donde también nació su hija, Lucila. Luego de realizar estudios posdoctorales en el ICTP, también en Trieste, se mudó con su familia a París, Francia. Allí fue investigador en el Observatorio de París, ciudad donde nació su hijo, Matías. Lucila hace unas esculturas (en plastilina) y unos dibujos (en todos lados) hermosísimos (¿infuencia italiana?); Matías literalmente devora ormas completas de queso (¿Francia?). Denise, esposa de Alejandro, aún no logró colocarlo en la buena senda. El autor persiste en dedicar tiempo para actividades tales como: la Educación en Astronomía (didáctica), la organización de conferencias para todo público (El Universo de Einstein), el descubrimiento de residencias donde vivieron personajes ilustres (la residencia Wassermann en Buenos Aires, donde vivió Einstein), la organización de concursos literarios juveniles (La Ciencia en los Cuentos), el descubrimiento y estudio de un manuscrito inédito de Einstein de 1925 (Science in Context), etc. Denise tampoco logró disuadirlo de que escribiera algunos libros, como los de Eudeba para chicos sobre Astronomía (¿Querés Saber?) y aquél en el que estudia el Cosmos de Dante Alighieri (Poética astronómica).

ÍNDICE

Capítulo 1

¿Qué es la cosmología? **9**

- La ciencia en la antigüedad y el paulatino despertar intelectual 11
- La unificación de la ciencia del cielo con la de la Tierra 13
- Einstein y una nueva teoría de la gravitación 14
- Nuevas teorías, nuevas predicciones 15
- Observaciones pioneras de la luz de las galaxias lejanas 16
- Un universo que se expande 18
- Línea de tiempo 20

- *Actividad 1: La ley de expansión de Hubble* *22*

Capítulo 2

una historia sucinta del universo **25**

- "La luz" más antigua del universo 30
- La formación de las estrellas, los planetas y, eventualmente la vida en la Tierra 31
- Un futuro deseado: la gran unificación de toda la Física 32

- *Actividad 2: El tiempo del Planck* *36*
- *Actividad 3* *38*

Capítulo 3

- **Universo en expansión** **41**
- El corrimiento al rojo de la luz 41
- El efecto Doppler-Fizeau y la recesión de las galaxias lejanas 42
- Aleksandr Friedmann 44
- Georges Lemaître 47
- El Big Bang 51

- *Actividad 4: Unificación de la física terrestre y de la celeste* *52*
- *Actividad 5: Si las galaxias se alejan con la expansión del universo, ¿cómo es que algunas colisionan entre si?* *54*

Capítulo 4

Pilares del Big Bang **57**

- La síntesis de los núcleos atómicos 58
- Materia no ordinaria 61
- La radiación cósmica del fondo de microondas 63
- El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo 65
- Esferas del luz: la superficie de la última difusión 67

- La geometría del universo 70
- El parámetro Omega 72

- *Actividad 6: La isotropía del espacio* *74*
- *Actividad 7: La homogeneidad del espacio* *75*

Capítulo 5

Limitaciones de los modelos: La Inflación **79**

- Un universo plano 80
- Un universo homogéneo 82
- Buscando soluciones a los problemas del Big Bang 84
- Monopolos 85
- La inflación 87
- Semillas gravitatorias primordiales 89
- La formación de estructuras astrofísicas 91
- Los fundamentos del Big Bang 92
- El principio cosmológico 94

- *Actividad 8: El principio cosmológico* *96*
- *Actividad 9: Isotropía versus homogeneidad* *98*

Capítulo 6

Planetas extrasolares **101**

- ¿Cómo se formó nuestro Sistema Solar? 102
- Planetas extrasolares 105
- Detección de exoplanetas y sistemas de planetas extrasolares 106
- ¿Exoplanetas como la Tierra? 109

Cuerdas cósmicas **113**

- Formación de defectos topológicos 118
- Generación de Corrientes en Cuerdas Cósmicas 122
- El futuro de los lazos de cuerdas cósmicas 124
- Efectos gravitatorios de las cuerdas cósmicas 125
- Astrofísica con cuerdas conductoras 128

El gran colisionador de hadrones LHC **131**

- *Algunas preguntas y respuestas sobre temas varios de cosmología* *138*
- *Glosario* *142*
- *bibliografía* *171*

"Siderius Nuncius" (Galileo Galilei)

"Acuarelas de la Luna" (Galileo Galilei)

Capítulo

1

¿Qué es la cosmología?

La cosmología es la ciencia que estudia el universo. De muy diferentes maneras, atrae y fascina a todos, especialmente a aquellos de nosotros que alguna vez nos pusimos a pensar en el lugar que ocupamos en el cosmos. Hoy en día, con el creciente grado de especialización en todas las actividades intelectuales, la tendencia es fraccionar, dividir los temas en sus partes orgánicas más pequeñas, de manera tal de poder inspeccionarlas con el máximo detalle. La cosmología, como la entendemos hoy, toma el sentido inverso. Trata de colocar juntas todas las piezas del gran rompecabezas que constituye el estudio del universo, y concebir un todo coherente y armonioso. Un poco como sucede con los pintores impresionistas, el cosmólogo se aleja de la tela y mira su obra como un todo, sin distraerse con los detalles particulares.

El universo es, en efecto, tanto en su constitución como en su funcionamiento, un sistema bello y armonioso: un *kosmos*, como lo entendían ya los griegos del siglo IV a.C. Así lo expresó Platón en su obra El Timeo, distinguiéndolo del Caos que sus antecesores habían imaginado para el origen del universo. La cosmología del siglo XXI no pretende explicar el origen del cosmos, pues los científicos saben bien que ese "origen" aún está vedado a las más recientes y desarrolladas teorías de la física. Esta afirmación quizás genere un poco de asombro, pues ¿qué podría significar Big Bang sino el "origen" del universo? Pues bien, veremos luego que el nombre Big Bang no significa lo que parece, y que hoy los cosmólogos no se abocan a explicar el origen (pues, ¿tuvo origen el cosmos?) sino más bien la evolución del universo que nos rodea.

Siguiendo con la historia, el discípulo más prominente de Platón, Aristóteles, fue el encargado de instaurar un modelo del cosmos tan real y coherente (de acuerdo al sentido común), que perduró como la imagen oficial que aceptaron filósofos de la naturaleza y poetas por igual, durante los siguientes dos mil años.

Pero la cosmología es más que esto. Es también la historia de la humanidad en busca de sus orígenes. Es el intento más que milenario de comprender las fuerzas naturales que rigen el cosmos, apartándose de aquellos pensamientos mágicos y fraudulentos que llevan por caminos truncos. La ciencia, que se fue perfeccionando con el correr de los siglos, hoy permite estudiar el cosmos de manera científica. Y cada nueva generación de estudiantes dispone de nuevos elementos –descubrimientos, observaciones, ideas– que les acercan un poco más a las respuestas que se buscan, desde siempre, sobre nuestro universo.

La ciencia en la antigüedad y el paulatino despertar intelectual

La ciencia del universo no nació ya adulta con los griegos. Hubo muchos pueblos que contribuyeron a darle forma. Más de cuatro mil años antes, las civilizaciones de la Mesopotamia, entre los ríos Tigris y Éufrates, observaron el movimiento de los astros. También recopilaron catálogos de estrellas y dividieron el cielo en las doce constelaciones del zodíaco.

Por su parte, los egipcios también fueron agudos observadores del cielo. Las inundaciones del Nilo, que inicialmente se mostraban caprichosas para una sociedad nómade y errante, con el tiempo se volvieron predecibles para las sociedades agrícolas estables que fundaron ciudades como la de Menfis. Sus observaciones astronómicas, llevadas a cabo generación tras generación, permitieron a los egipcios sincronizar los ritmos agrícolas con los del cielo, y hasta relacionar las crecidas del Nilo con la primera aparición anual de la estrella Sirio por el horizonte oriental.

Con el correr de los siglos, las ideas de un cosmos perfectamente esférico y cerrado, provisto de esferas cristalinas donde se engarzaban los planetas, como lo había imaginado Aristóteles, comienza a ser cuestionado. En el siglo II de nuestra era, Ptolomeo observa movimientos complicados en los planetas, lo que le lleva a establecer elaborados epiciclos para cada cuerpo celeste con el fin de salvar las apariencias y continuar aplicando las viejas ideas aristotélicas de movimientos circulares y de velocidad uniforme.

Llegado el Renacimiento, Copérnico publica su tratado sobre las revoluciones, donde desplaza a la Tierra del centro del cosmos y coloca en dicho lugar al Sol. Fue un salto intelectual difícil de imaginar en nuestros días, donde ciertos conceptos se dan por sentado, y que tardó años en difundirse y en ser aceptado por los estudiosos de la vieja Europa. Con este nuevo modelo, las observaciones astronómicas que desvelaron a Ptolomeo se hacían más naturales aunque, como podemos imaginar, el nuevo marco teórico encontró fuerte reacción en los ámbitos religiosos.

Impulsados por estos nuevos desarrollos teóricos, que en la época eran conocidos sólo por unos pocos eruditos, varios pensadores se sintieron asfixiados por la presencia de un universo dispuesto en capas y finito en extensión e imaginaron estrellas y planetas diseminados por doquier en un universo infinito. Uno de los máximos exponentes de estas novedosas ideas, Giordano Bruno, llegó incluso a imaginar infinitos planetas y con ellos la necesaria ubicuidad de la vida. En su fértil imaginación la idea era clara: si el poder de Dios era infinito –así pensaba él en su profundo sentimiento religioso–, también debería serlo su obra. Si en nuestro planeta Tierra había surgido la vida, ¿qué impedía a Dios diseminarla por el resto del universo?

Bruno y sus seguidores imaginaban que la Tierra abandona entonces su ubicación

central en el cosmos y, ahora, el Sol se convierte en una estrella más entre las infinitas que pueblan el cielo. El mundo supralunar aristotélico, pensado perfecto e inmutable, comienza a mostrar rajaduras severas y preocupantes: Tycho Brahe observa en 1572 una estrella nueva que rompe con el dogma de la inmutabilidad de los cielos. Más tarde, el mismo Tycho detecta un cometa que contornea el Sol a lo largo de su viaje por el cielo. Pero para hacerlo debía atravesar las esferas cristalinas de Aristóteles, y eso era algo imposible. Uno por uno van cayendo los supuestos de los antiguos griegos.

Las meticulosas observaciones –a ojo desnudo– realizadas a lo largo de los años por Tycho fueron heredadas por Johannes Kepler. Entre la inmensa cantidad de datos astronómicos a su disposición, Kepler dedicó sus mayores esfuerzos a estudiar el planeta Marte, cuyos movimientos retrógrados y variaciones de luminosidad habían, desde siempre, representado un enigma para los astrónomos. En 1605 Kepler tiene calculada su órbita: encontró una elipse y no una circunferencia como se había pensado desde la época de Aristóteles, con el Sol ubicado en uno de sus focos. Este hallazgo llegó a nuestros días como la primera ley de Kepler y, pese a que para Kepler representaba una ley deducida de la observación, años más tarde, con la teoría de la gravitación de Newton, recibió la necesaria formalización teórica. De hecho, todas las leyes del movimiento planetario pueden ser deducidas mediante el uso de la teoría newtoniana de la gravitación universal.

Los estudios de Kepler fueron contemporáneos a las observaciones de Galileo, este último, considerado fundador de la ciencia moderna por sus estudios en diversas áreas de la física del movimiento. En el ámbito de la investigación astronómica, Galileo fue el primero en apuntar su telescopio hacia el cielo, en 1609, hace unos cuatrocientos años. Y lo que allí observó contribuyó a dar el golpe de gracia a la "ciencia" de los antiguos pensadores griegos: la Luna resultó no ser etérea y perfecta como se pensaba, sino que estaba cubierta de cráteres y tenía aspecto rocoso. Además, al apuntar su telescopio hacia Júpiter comprobó que no todo giraba en torno a la Tierra, como se pensaba antes de Copérnico; ni en torno al Sol, como se pensaba después, sino que existían cuatro cuerpos celestes –los hoy célebres satélites galileanos– que giraban día tras día en torno a dicho planeta, mostrando que podían existir pequeños sistemas dentro del sistema solar mayor. También observó el planeta Venus y sus fases, y muchas cosas más. El camino quedaba así despejado –no sin dolor para los pioneros, por supuesto– para que la ciencia del cielo pudiera desarrollarse en completa libertad.

● Retrato de Galileo Galilei

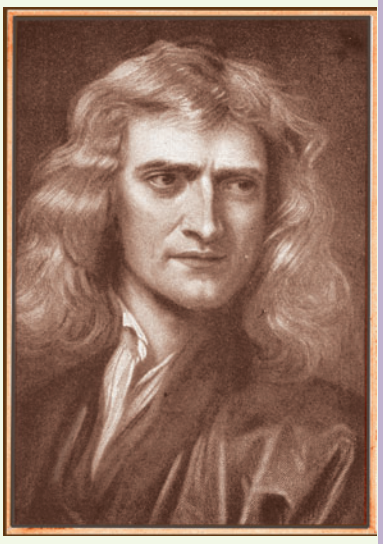
● Monumento erigido a Nicolás Copérnico en la ciudad de Varsovia (República de Polonia)

■ La unificación de la ciencia del cielo con la de la Tierra

Isaac Newton fue el encargado de elaborar una descripción matemática completa de la gravitación. Dicho marco teórico era el mismo que explicaba la física terrestre y la de los astros: desde la caída de una manzana, al movimiento de un cuerpo celeste como la Luna alrededor de la Tierra. Esta unificación -la primera gran unificación de la física- mostraba que la separación en dos reinos impuesta por Aristóteles para el universo –el supralunar de los astros y el sublunar de los objetos terrestres– era ficticia y carecía de fundamento. Junto a las observaciones de Galileo, comenzaba a ser claro para todos que la descripción física era una sola para todo el cosmos, y que la dinámica del universo estaba sujeta a la ley de la gravitación de Newton.

Tan precisa y útil resultó ser la teoría newtoniana, que pudo describir todas las observaciones astronómicas por más de dos siglos, hasta finales del siglo XIX. Fue en ese entonces, que el extraordinario nivel de precisión de las observaciones astronómicas mostró ciertas limitaciones en la teoría. El movimiento de Mercurio, por ejemplo, no obedecía exactamente lo que mandaban las leyes de Newton. La órbita de este planeta –el más cercano al Sol y el que más siente su campo gravitacional– sufría pequeñas perturbaciones que la alejaban en una cantidad ínfima –pero calculable– de lo que se predecía teóricamente.

Tanta confianza tenían los astrónomos en la teoría de Newton que cualquier idea alocada debía ser tenida en consideración antes de pensar en modificar la obra cumbre del gran Inglés. Así fue como se propuso, incluso, la presencia de un planeta nuevo en el sistema solar, inexistente, interior a la órbita de Mercurio –Vulcano lo llamaron–, que con su atracción gravitacional sería el responsable de alterar el curso de Mercurio. Vulcano fue buscado por mucho tiempo, pero jamás se dejó capturar por los telescopios de la época. Hubo que esperar hasta los inicios del siglo XX para que surgiera, de la mano de Albert Einstein, una nueva teoría del espacio-tiempo y de la gravitación, más compleja pero también más abarcadora; y para que Vulcano cayese en el olvido.



● Retrato de Isaac Newton

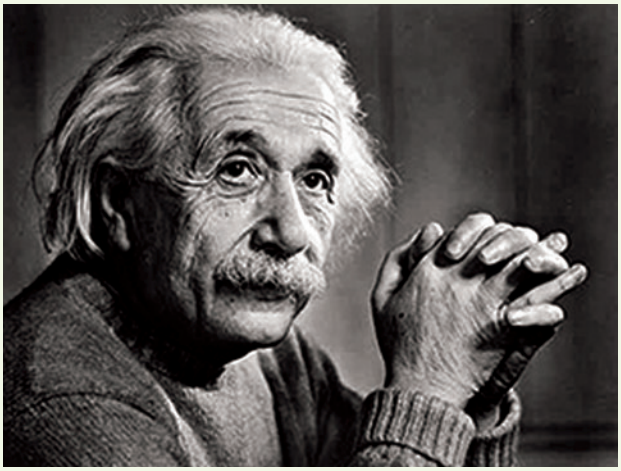
■ Einstein y una nueva teoría de la gravitación

La teoría de la relatividad que Einstein propuso en 1905 –llamada relatividad especial o restringida– ofreció los elementos básicos necesarios para que los científicos pudiesen describir los procesos relacionados con el comportamiento de la luz. En la vida cotidiana estamos acostumbrados a superponer velocidades de objetos en movimiento, a sumarlas y a restarlas. Por ejemplo, una persona dentro de un vagón que camina en la misma dirección en la que se mueve el tren se ve, desde el andén, como si se desplazara con una velocidad que es la suma de las velocidades del tren y la de sus piernas respecto al piso del vagón. Esta adición de velocidades, sin embargo, no está permitida para la luz. La relatividad especial postula que la velocidad de la luz es una constante para todo observador, y que no existe forma alguna de propagación de información que la sobrepase en velocidad. Si desde un tren en movimiento, en vez de caminar, disparásemos un rayo de luz con una linterna, la velocidad con la que se vería desplazarse a éste desde el andén sería la misma que con la que se lo vería desplazarse dentro del vagón, y en ambos casos la velocidad sería de unos 300.000 km/s.

Para explicar estas nuevas ideas –que luego se revelaron fieles a la observación astronómica– Einstein debió renunciar a varios de los postulados de Newton. El espacio newtoniano donde se desarrollaban todos los eventos de la física era rígido, inmutable e independiente de la materia que contenía en su interior. El tiempo newtoniano fluía de idéntica manera (y el andar de los relojes era idéntico) para todos los observadores, independientemente de su estado de movimiento relativo. Esto dejará de ser así en la teoría de la relatividad de Einstein. En esta teoría se propone un nuevo marco teórico en donde el fluir del tiempo y la longitud de los objetos se modifican de acuerdo al estado de movimiento de los observadores. Un viajero que emprende una travesía interestelar a altas velocidades –próximas a la de la luz–, si se mide su tiempo de viaje con un reloj fijo a la Tierra, se verá que envejece más lentamente que sus amigos terrestres. Estas novedades de la relatividad han dado origen a supuestas paradojas, como la célebre paradoja de los gemelos. La historia de un hombre que emprende un viaje a altísimas velocidades por el universo y que, cuando regresa a tierra, encuentra a su hermano gemelo hecho un anciano, mientras que, para él, han pasado tan solo un par de años. Estas y otras situaciones paradojales a veces nos sorprenden, pero la teoría de la relatividad las predice y explica adecuadamente.

Sin embargo, la relatividad restringida no podía explicar las anomalías observadas en el siglo XIX en la trayectoria de Mercurio. Para ello hizo falta más trabajo. Nuevamente fue Einstein quien, en 1915, propuso su teoría de la relatividad general. Este nuevo marco teórico, completamente diferente del newtoniano, constituyó una nueva teoría de la gravitación que permitió abordar el estudio de sistemas físicos que la teoría de Newton

debía dejar de lado. Regiones del espacio-tiempo einsteniano con concentraciones de materia inmensas, como las que se hallan en las cercanías de las estrellas, o velocidades tan grandes que desafían la imaginación, pueden ser ahora sometidas a un estudio científico adecuado. Mercurio es el planeta que se halla más próximo al Sol –cuerpo astronómico que concentra más del 99,99% de la masa total del sistema solar– y es por ello el planeta que más velozmente se desplaza en su órbita. Mercurio fue desde siempre el objeto "más relativista" de nuestro entorno astronómico, y el lugar natural para descubrir las pequeñas diferencias que separaban a las teorías de Newton y de Einstein. Uno de los primeros sistemas astronómicos a los cuales Einstein aplicó su nueva teoría fue precisamente Mercurio, explicando elegantemente las sutiles diferencias observacionales que quitaban el sueño a los astrónomos desde hacía décadas.



● Retrato de Albert Einstein

■ Nuevas teorías, nuevas predicciones

Como es usual en la ciencia, toda gran teoría científica no sólo da cuenta de los fenómenos que teorías previas fracasan en explicar. Una nueva teoría que se precie debe también predecir nuevos fenómenos que luego sean ratificados por la observación. Y la teoría de la relatividad general de Einstein cumplió también con este requisito. Esta teoría imagina el espacio-tiempo como una entidad deformable y dinámica. El espacio que contiene a la materia deja ya de ser inerte a esta materia y se ve modificado por ella. Para Einstein la fuerza gravitacional que Newton imaginara entre distintos cuerpos masivos ya no tiene razón de ser y es abolida de un plumazo. En su lugar, Einstein imagina la gravitación como un efecto geométrico. La materia hace curvar al espacio que la contiene, esto es, modifica las propiedades geométricas del espacio, y no lo hace de manera caprichosa, sino siguiendo las indicaciones precisas escritas en las ecuaciones de la relatividad general.

El tiempo también se ve afectado, y el fluir del tiempo se modifica en cercanías de campos gravitacionales intensos. Los planetas, en este nuevo marco teórico, siguen órbitas keplerianas no porque una fuerza newtoniana los mantenga unidos al Sol, sino simplemente porque la gran masa del astro, con su sola presencia, curvó el espacio que lo rodea y a los planetas no les queda otra opción que recorrer sus caminos sobre un espacio curvo.

Pero si es verdad que la fuerza de Newton ya no existe más y que la atracción gravitacional se debe a la curvatura del espacio, entonces esta curvatura afectará no sólo a los objetos con masa, como planetas y átomos (que llamaremos “objetos masivos”), sino también a toda entidad que se desplace en los alrededores del Sol, incluso a los corpúsculos de la luz. En efecto, y esta es una de las más fantásticas predicciones de la relatividad de Einstein: la luz "pesa", esto es, la luz se ve afectada por los cuerpos masivos. Años más tarde, en 1919, este nuevo efecto relativista fue verificado, y hoy constituye una de las herramientas más útiles para los astrónomos que investigan la constitución real del universo. En efecto, ahora se sabe que muchos objetos astronómicos no emiten ningún tipo de radiación que permita detectarlos (podríamos llamarlos entonces “objetos oscuros”).

Sin embargo, por el solo hecho de poseer masa, afectarán el espacio que los rodea, curvándolo, modificando la geometría de dicho espacio. Así, la luz de estrellas lejanas que pasa en las cercanías de estos objetos oscuros se verá desviada en su trayectoria, delatando la presencia de estos últimos.

Este efecto se conoce hoy con el nombre de "efecto de lente gravitacional", y permite a los astrónomos "ver" (en forma indirecta, claro está) incluso la llamada materia oscura que hoy se piensa es omnipresente en nuestro universo.

■ Observaciones pioneras de la luz de las galaxias lejanas

Mientras Einstein se abocaba a sus teorías de la relatividad, sus colegas astrónomos se dedicaban a catalogar los cielos, en forma completamente independiente de los nuevos desarrollos teóricos. Sorprendentemente, los estudios de Einstein coincidieron con la puesta en funcionamiento de grandes telescopios que permitieron a los astrónomos escrudiñar las galaxias con un nivel de detalle jamás visto (en aquel tiempo, a las galaxias se las denominaba "nebulosas espirales"). Nadie, en ese entonces, conocía la verdadera constitución de estos objetos nebulosos del cielo, y los astrónomos comenzaron a estudiar la luz que de ellos llegaba a la Tierra. Poco a poco se fueron conociendo sus espectros electromagnéticos, y se vio que los elementos químicos que abundaban en la Tierra también se hallaban presentes en las galaxias lejanas.

Es conveniente aclarar que también a comienzos del siglo XX se desarrolla la teoría

cuántica, el marco teórico de la física que explica la constitución íntima de la materia. De acuerdo a esta teoría, los átomos están formados por núcleos de cargas eléctricas positivas, que se hallan rodeados por "nubes" de electrones de carga negativa. Diversas transiciones energéticas del átomo hacen que los electrones "salten" entre distintas configuraciones posibles. Estas distintas configuraciones, no son cualesquiera, pues su distribución es discreta y por ello los niveles de energía resultan estar cuantizados. Esta terminología significa que los átomos no tienen un rango continuo de energías internas posibles, sino que hay ciertos niveles de energía permitidos y muchísimos otros que no son permitidos: la energía interna de un átomo no puede tomar cualquier valor. Esta energía toma sólo algunos valores discretos. Se dice entonces que la energía de los átomos está cuantizada.

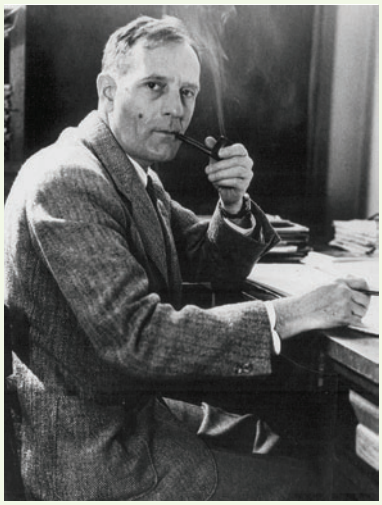
Las altas temperaturas de las estrellas que forman las galaxias excitan a los átomos y éstos, al querer reducir sus energías, emiten el excedente de energía en forma de fotones (corpúsculos de radiación). Distintos átomos emiten de diferente manera, y entonces, estudiando la luz que nos llega desde objetos lejanos, podemos inferir qué elementos químicos los forman.

Fue en este proceso de estudio observacional que astrónomos como Vesto Slipher y Edwin Hubble percibieron que las galaxias lejanas emitían luz con iguales características –llamadas líneas espectrales– que los átomos conocidos de la Tierra, pero con un corrimiento sistemático de sus longitudes de onda hacia energías más bajas. Todo indicaba que los objetos emisores de la radiación (las galaxias lejanas) no estaban quietos en el cielo, sino que por el contrario se desplazaban en sus posiciones, alejándose de nosotros, y que lo hacían a velocidades asombrosamente altas.

Como sucede en la vida cotidiana, cuando un tren hace sonar su sirena al llegar a la estación, esta sirena se percibe aguda (más energética) al acercarse, pero más grave (menos energética) al alejarse de nosotros –fenómeno conocido como efecto Doppler-Fizeau–. De idéntica manera, la luz de las estrellas se comportaba como la sirena del tren que se aleja: esta luz detectada aparecía modificada respecto a cómo era realmente. La luz de las estrellas lejanas aparecía desplazada hacia frecuencias (y energías) más pequeñas, o equivalentemente hacia longitudes de onda más largas. Esto indicaba que las estrellas lejanas se comportaban como trenes que se alejan, pero en lugar de escuchar su sirena los astrónomos detectaban la luz estelar.

En consecuencia, los objetos astronómicos emisores de la luz –las galaxias observadas– se estaban alejando efectivamente de la Tierra. Y eso sucedía en cualquier dirección del cielo que se explorase. La expansión del universo se mostraba así, por primera vez, a los astrónomos pioneros, aunque la comunidad de científicos todavía no estuviese preparada para entender lo que realmente se veía a través de los telescopios.

● Retrato de Vesto Slipher



● Retrato de Edwin Hubble

■ Un universo que se expande

Quien sí entendió este "mensaje de las estrellas" fue el sacerdote belga Georges Lemaître. Lemaître, luego de participar en la primera Guerra Mundial, doctorarse en ciencias físicas y matemáticas en la Universidad de Lovaina y más tarde ordenarse sacerdote en 1923, se dedicó de lleno, y en forma autodidacta, a estudiar la teoría de la relatividad. Durante el breve tiempo que pasa con una beca de estudios en los Estados Unidos de Norteamérica, Lemaître toma contacto con las observaciones de Hubble y de sus colaboradores. En aquel entonces, cuando nadie antes que él había notado las implicancias cosmológicas de las galaxias en pleno proceso de alejamiento, Lemaître, quien ya había hallado soluciones dinámicas en las ecuaciones de Einstein, se da cuenta de que la expansión de Hubble y la relatividad de Einstein podían tener algunos puntos en común: la estructura geométrica y la evolución del universo propuestos por la relatividad predecían la existencia de un universo en expansión. Hubble, aun sin saberlo, había ratificado las predicciones de la relatividad y descubierto dicha expansión. Pero fue Lemaître quien se encargó de unir teoría y observación.

A partir de ese momento, nace la idea de un universo dinámico, un universo que no siempre fue igual a sí mismo, sino que va evolucionando con el tiempo.

Es esta evolución, que sigue leyes físicas bien precisas, lo que nos permite hablar de una "historia" del universo. En particular, sabemos que la velocidad de expansión del universo está dada por un parámetro clave de la cosmología, que hoy conocemos como

el "parámetro de Hubble". Cabe aclarar que el primero que midió este número fue el propio Hubble, quien dio un valor constante a este parámetro (de ahí que muchas veces se lo mencione como la "constante de Hubble"). El parámetro de Hubble mide la tasa de expansión del universo durante toda su historia. Esta expansión no siempre fue constante, sino que ha ido variando –principalmente disminuyendo– con el paso del tiempo.

La cosmología teórica y las observaciones astrofísicas indican que el universo se halla en pleno proceso de expansión. Y a muy grandes escalas astronómicas, las diferentes galaxias lejanas pueden verse como meros puntos –o "partículas galácticas"– rodeados de inmensas extensiones de vacío en expansión: partículas y grandes extensiones vacías que constituyen nuestro universo observable. Nuestro universo, entonces, puede interpretarse como una suerte de "gas de galaxias" en expansión, y los cosmólogos pueden así calcular sus propiedades muy sencillamente. Una de las características más importantes que surgen del análisis es la que nos indica que, como sucede para todo gas en expansión, la temperatura del universo decrece: el universo visto a muy grandes escalas de distancias, se va enfriando paulatinamente con su expansión.

Pero si el universo se enfría con el paso del tiempo, ¿qué sucedería si –imaginariamente– viajáramos hacia el pasado? Aunque sabemos bien que no podemos realizar este viaje en persona, las leyes físicas que conocemos –y que sabemos emplear para distintas condiciones del universo– sí nos permiten embarcarnos en dicha travesía con la imaginación, y calcular las diferentes características de nuestro universo en el pasado, de acuerdo a su cambiante temperatura.

Hagamos este rápido viaje a través de la historia del universo, recreado mediante el uso de la física conocida en la actualidad. En el próximo capítulo iniciaremos nuestro recorrido, desde los tiempos más primordiales a los que tenemos acceso, a través de la ciencia.

● Georges Lemaître junto a Albert Einstein

• Línea de tiempo de algunos de los personajes y eventos más notables de la cosmología

25 siglos a.C. Egipcios

Observación detallada de los astros. Empleo práctico de la astronomía y creación de un calendario solar.

20 siglos a.C. Babilonios

Observación de los astros. Regularidades y movimientos peculiares de los planetas (vagabundos celestes). Acumulación de datos astronómicos. División del camino del Sol en doce partes, instauración del zodíaco.

5 siglos a.C. Griegos

Énfasis en el modelado geométrico del cosmos. Imaginan los elementos básicos que forman el universo. Dejan de lado en parte las explicaciones místicas sobre el cielo. Inventan varios modelos cosmológicos.

Siglo II Ptolomeo

Realiza un catálogo de estrellas. Su obra, El Almagesto, define el rumbo de la astronomía por los siguientes siglos hasta el advenimiento de las ideas heliocentristas. Efectúa una descripción de los movimientos planetarios con epiciclos y deferentes, sin justificar sus causas, tan solo con la idea de explicar lo que se veía en el cielo.

1609 Galileo Galilei

Emplea el telescopio para estudiar el cielo. Observa la superficie irregular de la Luna. Estudia a Saturno, distinguiendo su forma extraña, no esférica, que sólo cincuenta años más tarde se habría de justificar (nos referimos a los famosos anillos). Galileo también apuntó su telescopio hacia Júpiter y descubrió cuatro de sus satélites, comprobando así que podía existir un pequeño "universo" dentro de otro mayor, y que no todo astro estaba obligado a girar alrededor de la Tierra. Acumula múltiples evidencias en contra del universo aristotélico.

1687 Isaac Newton

Publica su obra cumbre *Principia Matemática*, considerado uno de los libros de mayor influencia de la historia de la ciencia. En este tratado, Newton sienta las bases de la mecánica y describe la fuerza de la gravitación universal. Muestra que el movimiento de los objetos en la Tierra y aquel de los astros en el cielo obedecen las mismas leyes naturales. Demuestra la consistencia de las leyes de Kepler con la teoría de la gravitación por él propuesta.

Fines del Siglo XIX

Los astrónomos encuentran anomalías en la órbita de Mercurio. Su punto orbital de mayor acercamiento al Sol (el perihelio) mostraba discrepancias entre las predicciones de la teoría newtoniana y las observaciones astronómicas.

1905 Albert Einstein

Publica su teoría de la relatividad especial; espacio y tiempo dejan de ser absolutos y se amalgaman en una nueva entidad, el espacio-tiempo.

1543
Nicolás Copérnico

Publicación del *De revolutionibus orbium coelestium*, tratado fundamental en el que con diversos argumentos se sugiere remover a la Tierra del centro del universo, y ubicar en ese lugar privilegiado al Sol (modelo heliocéntrico del universo).

1572
Tycho Brahe

Descubrimiento de una supernova en la constelación de Casiopea. Se duda sobre la inmutabilidad de los cielos, como los había escrito Aristóteles. La realidad física de las esferas cristalinas que se pensaba arrastraban a los planetas en su orbita alrededor de la Tierra, pierden sustento. Tycho fue quizás el más importante de los observadores del cielo de la época pre-telescopio.

1584
Giordano Bruno

Publicación de *Sobre el Infinito Universo y los Mundos*. Esboza ideas sobre la no centralidad de la Tierra en el cosmos y se convierte en uno de los mayores difusores de la doctrina copernicana. Sugiere que la Tierra no tiene porqué ser el único planeta de su tipo, ni el Sol la única estrella capaz de sustentar la vida en el universo. Sugiere la "pluralidad de los mundos habitados".

1605
Johannes Kepler

Trabaja junto a Tycho Brahe y, a partir de las observaciones de este último, calcula la órbita elíptica del planeta Marte. Rompe así con el viejo axioma griego de la exclusividad de los movimientos circulares y uniformes. Años más tarde, propone sus famosas leyes de los movimientos de los planetas.

1915
Albert Einstein

Publica su teoría de la relatividad general; en ésta es la materia-energía la que curva el espacio-tiempo, y esta modificación en la geometría espacio-temporal hace las veces de la gravitación. Con esta nueva teoría, Einstein resuelve el movimiento anómalo del perihelio de Mercurio, y de su teoría surgen nuevas e insospechadas predicciones que, con el correr de los años, los experimentos han podido ratificar.

1922
Aleksandr Friedmann

Emplea la relatividad general de Einstein para describir el universo. Sus dos trabajos fundamentales datan de 1922 y 1924, y en ellos se describe la posibilidad de un universo dinámico, contrariamente a la idea de "estaticidad" que reinaba por la época.

1927
Georges Lemaître

Publica su trabajo sobre el universo en expansión y relaciona la teoría de Einstein con las observaciones de galaxias lejanas.

1929
Edwin Hubble

Publica sus observaciones de galaxias lejanas y la relación lineal entre la distancia y el corrimiento espectral de la luz de las galaxias. Sus observaciones fueron, más tarde, interpretadas como la evidencia de que nuestro universo se halla en un estado de expansión.

1964
Arno Penzias y Robert Wilson

Descubren un débil fondo de radiación residual -la radiación cósmica de fondo- que será un elemento clave para la cosmología. Este fondo de radiación demuestra que el pasado del universo fue muy diferente a como es ahora. Confirma la idea de un universo que evoluciona en el tiempo. A su vez, el estudio de este fondo de radiación permite hoy entender el estado preciso del cosmos miles de millones de años atrás. En 1978 Penzias y Wilson reciben el Premio Nobel de Física por este hallazgo.

1965 / Robert Dicke, James Peebles, Peter Roll y David Wilkinson

Interpretan correctamente el fondo de radiación descubierto por Penzias y Wilson como un remanente del universo embrionario.

1981
Alan Guth

Propone su modelo del universo inflacionario, como una solución posible para algunos de los problemas que aquejan a los modelos del Big Bang.

1992
La misión COBE de la NASA

Anuncia sus resultados que confirman que la radiación de fondo descubierta por Penzias y Wilson posee muy pequeñas irregularidades en su intensidad. Estas son interpretadas como debidas a las primeras concentraciones de materia que habrían dado origen a las estrellas y galaxias que hoy vemos en el cielo.

1998
Observaciones de Supernovas de un tipo particular (llamadas de tipo Ia)

Permiten a los astrónomos detectar la luz emitida en dichas explosiones desde regiones del universo asombrosamente distantes. Para llegar hasta los telescopios de la Tierra, la luz observada ha estado viajando durante miles de millones de años, y por lo tanto ha debido recorrer largas distancias a través de un universo en expansión. A partir del estudio de la luz de estas supernovas, cuya intensidad depende del tipo preciso de expansión del universo, se obtuvo evidencia de que el cosmos se estaría expandiendo a una velocidad que aumenta con el tiempo. El mecanismo físico que impulsaría dicha expansión "acelerada" aún es tema de debate entre los cosmólogos.

Actividad 1: La ley de expansión de Hubble

Aún nadie viajó a otra galaxia. Sin embargo, lentamente, los astrónomos del siglo pasado lograron calcular a qué distancias se hallan muchas galaxias cercanas a la Vía Láctea. Además, empleando potentes telescopios, los astrónomos lograron estudiar las características de la luz que nos llega de galaxias lejanas. Vieron que esa luz se modifica por efecto Doppler-Fizeau: el espectro de la luz aparecía corrido hacia frecuencias más pequeñas, o equivalentemente hacia longitudes de onda más largas. La conclusión fue que las galaxias se estaban alejando de nuestra propia galaxia (y por supuesto también de la Tierra). En 1929, Edwin Hubble, propuso una relación entre la velocidad de recesión de las galaxias lejanas, "v", y la distancia a la que se hallan con respecto a la Tierra, "d". Una relación que daba cuenta de sus propios hallazgos en el telescopio de Monte Wilson, y de muchísimas otras observaciones de astrónomos anteriores.

La relación, conocida como la ley de expansión de Hubble, es la siguiente: $v = H\ d$

Hubble supuso que H era una constante. ¿Qué podemos deducir de esta relación? Si la galaxia B se encuentra al doble de distancia de la Tierra comparada con la galaxia A, ¿Cómo será la velocidad de alejamiento de B comparada con la de A? ¿Y una galaxia C, ubicada al triple de distancia de la Tierra que A?

La constante H tiene un valor aproximado hoy que es muy diferente de aquel que propusiera Hubble a partir de sus observaciones. ¿Qué pasaría si H fuera el doble de grande de lo que es hoy en realidad? Sabiendo las unidades de "v" (expresadas, por ejemplo, en kilómetros / segundo) y las de "d" (expresadas en Megaparsecs). ¿Qué unidades tendrá H?

Y la inversa de H, es decir, la cantidad 1/H, ¿Qué unidades tendrá? ¿1/H puede llegar a tener algún significado interesante? ¿Existe alguna manera de graficar el efecto de la expansión?

Imaginemos ahora que en una galaxia muy alejada de la Vía Láctea existe una civilización curiosa como la nuestra y, dentro de esta, un ser inteligente como Hubble, y que además realiza las mismas observaciones que nuestro astrónomo, y deduce la misma relación $v = H\ d$. ¿Cambia en algo la idea que tenemos sobre el efecto de expansión que se deduce de esta relación? En otras palabras, ¿la ley de expansión de Hubble depende de la ubicación en el universo del observador? ¿Existe una manera de graficar la ley de expansión de Hubble de modo tal que ambos observadores (nuestro astrónomo y su par de la otra galaxia) queden conformes con lo que ven?

• Respuestas a la actividad 1: La ley de expansión de Hubble

Si la galaxia B se halla al doble de distancia que la galaxia A, la velocidad de alejamiento de B será el doble que la de la galaxia A.

De forma análoga, la velocidad de alejamiento de la galaxia C será el triple de la velocidad de la galaxia A.

Si H fuera el doble de grande de lo que realmente es, todas las velocidades de galaxias lejanas (a una distancia fija de la Tierra) resultarían ser el doble de lo que realmente son.

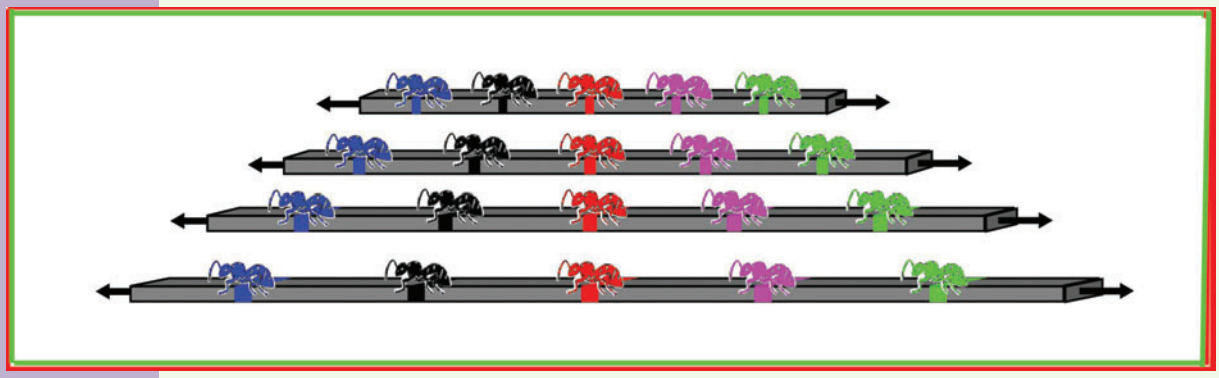
Sabiendo que las unidades de "v" pueden expresarse en kilómetros/segundo, y las de "d" pueden expresarse en megaparsecs, las unidades de H vendrán dadas en “kilómetros/segundo/megaparsec”. Es decir, si H vale 100 km/s/Mpc, esto significa que una galaxia lejana que se halla a 1 Mpc de la Tierra se estará desplazando con una velocidad de 100 km/s.

La inversa de H (o sea, 1/H) también tiene un significado sumamente interesante, pues puede expresarse en unidades de tiempo: basta darse cuenta de que “kilómetro” y “megaparsec” son básicamente unidades de distancia. Podemos “simplificarlas” y sólo queda el “tiempo”. Si H tiene unidades de “la inversa de tiempo”, 1/H tendrá unidades de tiempo. En cosmología, 1/H da una idea del “tiempo de vida del universo”.

Finalmente, ¿cómo podemos graficar el efecto de la expansión? ¿Cómo podemos graficar un espacio en expansión que arrastra a las galaxias y las aleja unas de otras?

Como mencionamos en el texto, si una galaxia se halla al doble de distancia que otra,

la primera se desplazará al doble de velocidad que la segunda. Eso puede graficarse con hormigas en vez de galaxias y con una banda elástica en lugar del "espacio". La figura de abajo dice cómo hacerlo y muestra como un espacio en expansión aleja a las galaxias, y lo hace con mayor velocidad cuanto mayor sea la distancia que las separa.



● Aquí se muestra un espacio "unidimensional" en una secuencia de cuatro tiempos distintos. A pesar de que las hormigas no caminan, la distancia entre ellas aumenta como producto de la expansión del espacio donde ellas viven (una banda elástica, por ejemplo). Vemos que las hormigas que se hallan en los extremos de la banda recorren el doble de distancia que aquellas que rodean a la hormiga del medio en el mismo lapso de tiempo.

Notemos que, como para los habitantes de nuestro universo, en este universo unidimensional no existe lugar privilegiado; toda hormiga ve que sus vecinas se alejan inexorablemente de ella. Y aquellas más alejadas se alejan con una velocidad mayor, exactamente como lo indica la "ley de expansión de Hubble", y que se deduce de los modelos cosmológicos de la relatividad general de Einstein.

Si ahora imaginamos una galaxia muy alejada de la nuestra con habitantes curiosos como nosotros, que deducen la misma ley de expansión de Hubble, ¿qué significa?

Significa que ningún lugar del cosmos es especial. Que lo que nosotros vemos en la Tierra será lo mismo que verá cualquier habitante de una galaxia suficientemente alejada de la nuestra. La ley de Hubble no depende del lugar donde se halle el observador. Todos deberían ver lo mismo, como sucede con las hormigas sobre la banda elástica: cualquiera de ellas ve que las demás hormigas se alejan de ella. Ninguna puede afirmar que se encuentra en el "centro". Ninguna es el centro. Todas tienen idéntica situación en este universo (la banda elástica, por ejemplo) sin centro.

Capítulo 2

Una historia sucinta del universo

"Codice Dresden" (Maya)

En lo que sigue, separaremos la historia del universo en períodos temporales. Las divisiones se realizaron de acuerdo a los procesos físicos más relevantes que toman lugar en ellas. Más adelante, resumiremos esta sección en una Tabla con algunos detalles más. *[Ver la Tabla: Una breve historia del universo (pág.35)].*

Tiempo "0" - 10^{-43} segundo. Esta es la fase más temprana imaginada para el universo, y donde la física teórica aún no puede acompañarnos. Corresponde a un universo con materia-energía indiferenciada donde la relatividad de Einsten se quiebra. Al final de esa fase (cuando el tiempo de vida del universo coincide con el llamado "tiempo de Planck", 10^{-43} segundos) se piensa que el "gravitón" (la partícula cuántica asociada a la geometría del espacio-tiempo) se separa de las demás formas de materia. También en este instante, el espacio-tiempo adquiere las cuatro dimensiones que conocemos hoy y en las que se basa la relatividad (clásica) de Einstein (tres dimensiones espaciales y una temporal).

Con la separación de la gravitación de las demás interacciones fundamentales conocidas (las llamadas fuerzas nucleares fuerte, débil y la interacción electromagnética), la materia se ve sujeta a una nueva interacción de gran unificación, que podríamos llamar "fuerte-débil-electromagnética". Una de las grandes esperanzas de la física contemporánea es comprender bien los procesos físicos que caracterizan a la era de Planck.

Tiempo 10^{-43} segundo - 10^{-35} segundo. Luego de la era de Planck, comienza un período dominado por la "radiación". Vale aclarar aquí que esta "radiación" no está relacionada con la radiación electromagnética (por ejemplo, con la luz) como la conocemos hoy. En cosmología, denominamos "radiación" a todos aquellos componentes del universo –sean partículas que posean o no masa– con masas asociadas menores a la energía térmica reinante del universo.

En los primerísimos instantes de la vida del cosmos, las temperaturas predichas son inmensas y por ello, aun partículas estables de masa no nula, pueden caer bajo la denominación de "radiación". En el universo actual, cuando la temperatura del espacio profundo se halla a unos pocos grados (3 K) por encima del cero absoluto (o cero kelvin), sólo los fotones (corpúsculos de luz, de masa nula) y los neutrinos no masivos (y quizás también alguna partícula nueva aún no detectada por los físicos) reciben dicha denominación.

Esta época "dominada por la radiación", como se la conoce técnicamente, se extenderá por varias decenas de miles de años, hasta que el universo, en continua expansión y permanente enfriamiento, vea disminuir su temperatura a tal punto que puedan darse las condi-

ciones propicias para la formación de los primeros átomos de la materia neutra conocida.

Hacia el final de este período de la vida de nuestro universo, 10^{-35} segundos, las fuerzas fundamentales y sus partículas asociadas –excluyendo a la gravitación, por supuesto– que formaban una suerte de interacción indiferenciada "fuerte-débil-electromagnética", se separan. La descripción física de la realidad en esta nueva etapa de la vida del universo distingue la interacción "electro-débil" de la interacción nuclear fuerte. Vale decir, la interacción nuclear fuerte, en esta época, viene descripta en forma independiente de la electro-débil. Esta última interacción, por su parte, representa en forma "unificada" a las dos futuras interacciones: la nuclear débil y la electromagnética, que hoy son bien conocidas.

La interacción nuclear débil es la responsable del decaimiento radiactivo de muchos núcleos atómicos, por ejemplo, en el caso de un neutrón que se convierte en un protón, más un electrón y otra partícula subatómica (llamada antineutrino). Por su parte, la interacción electromagnética es aquella que describe en forma unificada las propiedades bien conocidas de la electricidad y del magnetismo, además de la existencia de las llamadas ondas electromagnéticas que, al viajar lejos de su fuente y ser detectadas con antenas especiales, hacen posible las comunicaciones inalámbricas (tan comunes en nuestra sociedad que ya casi no nos detenemos a pensar en ellas).

La descripción física de la realidad cuando nuestro universo cuenta con esos 10^{-35} segundos de vida, distingue también a las diferentes partículas asociadas a cada tipo de interacción: los quarks y los llamados "gluones", para el caso de la interacción nuclear fuerte. Los quarks son los futuros constituyentes de los nucleones (las partículas del núcleo atómico), vale decir, los "ladrillos fundamentales necesarios para armar un protón o un neutrón. Por su parte, los gluones son los corpúsculos "mediadores" de la interacción fuerte, como el fotón lo es para el electromagnetismo. En otras palabras, si un electrón "se entera" de la presencia de otro electrón en su cercanía (y que, por poseer idéntica carga eléctrica, deben repelerse), es gracias a que existen fotones que van y vienen entre ellos: los fotones son las partículas mediadoras de la interacción electromagnética. En el caso de la interacción fuerte entre quarks, ese papel de mediadores lo realizan los gluones. Es por ello que son los gluones los que se encargan de mantener "pegados" ("glue" – pegamento en inglés) a los varios protones nucleares, cuyas cargas eléctricas iguales los tenderían a separar).

Queda claro, entonces, el motivo por el cual los átomos pesados (con muchos neutrones y protones en su interior) no se desarman: la fuerte interacción entre los quarks que forman los nucleones, mantiene unidos a éstos últimos. Como la interacción fuerte es la que domina en las escalas nucleares, vale decir dentro del núcleo, la repulsión eléctrica entre los protones de igual carga eléctrica resulta ser subdominante y el núcleo logra su estabilidad.

A la etapa precedente sigue una etapa cosmológica aún en intenso estudio dentro de la física de las partículas elementales, llamada la "bariogénesis", o sea, la generación de

los elementos básicos para la formación de los "bariones". Los bariones son partículas relativamente pesadas en el reino subatómico. Como ejemplos casi cotidianos, podemos mencionar a los protones y a los neutrones que, como ya dijimos, son los constituyentes del núcleo atómico. En pocas palabras, los físicos piensan que en el universo primitivo deberían haberse generado igual número de partículas y de antipartículas. Sin embargo, hoy, esta "antimateria" no es tan abundante como la materia que nos rodea, y que observamos en nuestro entorno astronómico. En efecto, desde hace años la antimateria se detecta en los rayos cósmicos que provienen del espacio exterior y los grandes aceleradores de partículas pueden producirla (y hasta almacenarla) con facilidad. Pero es un claro hecho observacional que una de las dos especies ha sido privilegiada por la naturaleza (y es a esa especie a la que bautizamos "materia"). La teoría propone que durante la bariogénesis un grupo de procesos físicos logra generar ese desequilibrio necesario que privilegia el número de quarks en desmedro de los antiquarks: o sea, privilegia a las partículas por encima de las antipartículas. Y es así como la física contemporánea propone la "creación de las partículas".

Tiempo 10^{-35} segundo - 10^{-12} segundo. Esta nueva etapa en la evolución del universo ve la separación última de las interacciones y de la materia indiferenciadas. La que antes era una interacción común –que llamamos electro-débil– formada por la "unión" del electromagnetismo con la fuerza nuclear débil, ahora se separa. Partículas relativamente livianas (comparadas con los futuros bariones) como los electrones y los neutrinos, globalmente llamadas "leptones", adquieren sus masas características. Por su parte, con el electromagnetismo surge también el fotón, la partícula (a veces llamado el "quantum") del campo electromagnético que nos es tan familiar. Como lo señalamos más arriba, el fotón es el corpúsculo mediador de la interacción y "aquella" partícula que "informa" a un electrón, por ejemplo, que hay un protón presente en la cercanía y que ambos, por poseer cargas eléctricas diferentes, se deben atraer.

Tiempo 10^{-12} segundo - 10^{-4} segundo. Esta es la llamada era "hadrónica" y la temperatura reinante en el universo hacia el final de esta era se aproxima a los 10^{12} K. En esta etapa los quarks, que previamente se hallaban relativamente libres –formando una suerte de "sopa primordial" con el resto de los constituyentes del universo–, se ven súbitamente recluidos –"confinados"– en grupos de dos y de tres; grupos que darán origen a los llamados mesones y bariones, respectivamente. Estos dos tipos de partículas compuestas por quarks llevan el nombre de "hadrones". Como vemos, la materia se va lentamente organizando en estructuras cada vez más complejas, aunque aún falta esperar unos minutos más (literalmente) para que se formen los núcleos estables.

Tiempo 10^{-4} segundo - 1 segundo. No todas las partículas son "compuestas". Entre las más conocidas, los electrones y los neutrinos son consideradas al día de hoy como partículas realmente "elementales" e indivisibles, esto es, no formadas por otras partículas más pequeñas o menos masivas. Estos últimos, los neutrinos, permanecen en continua

interacción con el resto del plasma primordial (esa "sopa" que mencionamos antes) a través de la interacción nuclear débil, por ejemplo colisionando (fusionándose) con neutrones para "desaparecer" dando origen a protones y electrones (entre otras posibles interacciones que afectan a los neutrinos). Pero, llega un momento en el que también los neutrinos se "desacoplarán" de esta sopa de partículas (dejarán de interactuar con los constituyentes de la "sopa"), y eso ocurre hacia el final de esta etapa, cuando el universo cuenta con 1 segundo de vida aproximadamente. A partir de ese momento (conocido como el "desacoplamiento débil") los neutrinos evolucionan en forma independiente del resto de las partículas.

Tiempo 1 segundo - 5 segundos. En esta etapa, la temperatura (o energía) del universo desciende hasta aproximadamente la masa-energía característica de los electrones y antielectrones (estos últimos llamados "positrones", de igual masa que los electrones). Aunque la magnitud de la carga eléctrica de los positrones es idéntica a la de los electrones, el signo de la carga es el opuesto. Hasta este momento, estos electrones y positrones formaban parte del plasma primordial (no así los neutrinos, como ya vimos antes) y se hallaban en continua interacción con los fotones. Al haber energía suficiente, los pares de partículas y antipartículas se creaban y destruían constantemente. Pero al descender la temperatura cada vez más, llega un momento en el que ya no es posible crear los pares de electrones y positrones que se van aniquilando. La temperatura umbral es de unos cinco mil millones de grados, y equivale –usando la relación $E=mc^2$– a una masa de 10^{-27} gramos para el electrón (o el positrón).

El resultado es que la mayoría de los positrones se aniquila con los electrones (pues si una partícula se encuentra con su antipartícula, la aniquilación es inevitable, y de la materia-energía disponible antes de encontrarse surgen un par de fotones de muy alta energía). De esa aniquilación surgen nuevos fotones muy energéticos –rayos gamma– que contribuirán a aumentar la temperatura del plasma, que aún incluye a los antiguos fotones generados varias etapas atrás. Como consecuencia de los procesos físicos que se desarrollan en esta era (llamada "era de aniquilación electrón-positrón"), los fotones del plasma –que venían enfriándose con la expansión del universo– ahora reciben una "inyección" nueva de energía que les eleva un poco la temperatura.

Tiempo 5 segundos - 3 minutos. Esta es la etapa cósmica donde se crea la materia propiamente dicha (o, al menos, donde comienza a crearse la materia normal). Hacia el final de esta fase comienzan a formarse los núcleos atómicos más livianos siguientes al hidrógeno (cuyo núcleo consta tan sólo de un protón). El motivo es simple de entender: las energías y temperaturas reinantes ahora, aproximadamente mil millones de grados (10^9 K), corresponden a las energías características de unión –de "ligadura"– de los núcleos más livianos. Por debajo de estas energías, los núcleos tienden a unirse, y el plasma donde se hallan sumergidos no logra destruir las nuevas uniones (simplemente, la "temperatura ambiente" del universo no alcanza para desarmarlos). Se produce entonces lo

que técnicamente se denomina la "nucleosíntesis primordial". Comienzan formándose los núcleos del deuterio y del tritio (dos variedades de hidrógeno pesado, pues dichos núcleos contienen uno y dos neutrones, respectivamente, además del protón nuclear); también se forman el Helio-3, el Helio-4, el Litio-7, y algunas trazas de otros elementos más.

■ La “luz” más antigua del universo

Hasta aquí el universo es una gran nube –infinita, según se piensa hoy– de muy alta temperatura (nube que antes llamamos un plasma primordial), repleta de partículas elementales, núcleos livianos y fotones. Tal es su densidad que estos fotones –la luz– no pueden propagarse libremente sin chocar una y otra vez contra las diversas partículas cargadas eléctricamente que tienen a su alrededor. El universo resulta ser una nube opaca a la radiación.

Con el descenso de la temperatura y la expansión del universo, la radiación se diluye cada vez más. No sólo disminuye la densidad de fotones (vistos como corpúsculos de radiación) sino que, además, cada uno de estos fotones pierde color o frecuencia (que no es otra cosa que la energía del fotón) debido a la expansión. Por su parte, la materia masiva también se diluye con la expansión, pero en menor medida que la radiación. El resultado neto es que llega un momento en el cual el universo deja de verse dominado por la radiación, y pasa a estar "dominado por la materia" (en esta terminología, se entiende que hablamos de partículas materiales masivas). Esto ocurre –la "igualdad entre materia y radiación"– cuando el universo tiene unos 50.000 años de vida, aproximadamente, y una temperatura que ronda los 10.000 grados.

Al llegar a los 400.000 años de vida, se forman los primeros átomos, es decir los electrones comienzan a "orbitar" alrededor de los núcleos, dando origen a la materia neutra (a su debido tiempo, los átomos formarán moléculas, y así se irá estructurando cada vez más la materia masiva). Es en ese momento cuando la luz logra propagarse por largos períodos de tiempo sin casi sufrir interacciones. El universo que antes era opaco a la radiación electromagnética, ahora se vuelve transparente. Para un observador –con ojos apropiados, pues aún la luz (la radiación electromagnética) no se encuentra en el rango visible– es posible ahora "ver" a grandes distancias.

Esta radiación que se libera de su interacción con la materia comienza a propagarse libremente cuando el universo cuenta con unos 400.000 años de vida. Como no proviene de ningún cuerpo astronómico (pues aún no había estrellas ni galaxias en el universo) sino que se trata de un fondo de radiación que inunda el cosmos, se la llama la "radiación cósmica de fondo". Sus características, y la idea de que efectivamente este fondo de radiación se separó de la materia en una época tan temprana del universo, hacen que se la considere hoy un verdadero "vestigio" del universo embrionario.

Detectar hoy este fondo de radiación equivale a disponer de una "fotografía" de cómo era el universo a los pocos cientos de miles de años de vida, realmente nada si lo comparamos con la edad que los cosmólogos estiman para el universo actual (unos 13.700 millones de años). Este fondo cósmico de radiación fue el gran descubrimiento –sorpresivo– que realizaron en 1964 los dos radioastrónomos norteamericanos Arno Penzias y Robert Wilson.

El estudio detallado de la radiación cósmica de fondo le permitió a los cosmólogos realizar avances significativos en la comprensión del universo en épocas remotas, brindando las herramientas imprescindibles para verificar muchos de los hitos que jalonan la historia del cosmos que describimos en los párrafos anteriores.

● El autor de este libro junto al premio Nobel Robert Wilson, en ocasión de la Conferencia Inaugural del Año Internacional de la Astronomía. París, enero 2009.

■ La formación de las estrellas, los planetas y, eventualmente la vida en la Tierra

Tiempo 400.000 años - 200 millones de años. Luego del desacople de los fotones del fondo cósmico, comienzan a formarse, por atracción gravitatoria y ulterior condensación, nubes más y más densas de materia (principalmente compuestas de hidrógeno). Algunas de estas nubes de gas primordial son muy grandes, y cuando se condensan –proceso que lleva millones de años– generan grandes presiones y temperaturas en su centro. Estas temperaturas son suficientes como para producir reacciones de "fusión nuclear" que unirán los núcleos más livianos y los transformarán en núcleos pesados. Este proceso nuclear libera energía (nuevamente con la relación $E=mc^2$) que es irradiada hacia el exterior del astro: el objeto astronómico recién formado "se enciende"; ha nacido una estrella.

Las estrellas se comportan como verdaderos hornos nucleares, que toman los núcleos livianos y los "cocinan" para formar elementos más pesados (vale decir, elementos químicos con mayor número de protones y de neutrones en sus núcleos). Pero de estos procesos, no sólo surgirán estrellas. Las nebulosas primigenias en rotación, en cuyos centros incandescentes se forman las primeras estrellas, dejarán sin condensar restos de materia que no han logrado viajar hacia el centro de la formación. Dichos restos, más fríos, quedarán entonces en la periferia de la nueva estrella, trasladándose a su alrededor y, lentamente, bajo los efectos nuevamente de la gravitación, se condensarán en proto-planetas. Hoy, con va-

rios cientos de planetas extra-solares ya descubiertos por los astrónomos, estas ideas sobre la formación de los sistemas extra-solares toma una nueva significación. Veremos con un poco más de detalle el tema de los exoplanetas más adelante en este libro.

Estas nebulosas, que fueron generando sistemas solares, se agruparán lentamente en aglomeraciones aún mayores, dando origen a galaxias y cúmulos galácticos de extensiones tales que su mera descripción en unidades usuales nos llevaría a escribir cifras más largas que las que nuestros lectores podrían llegar a tolerar. Hoy se piensa que nuestra galaxia, la Vía Láctea, surgió de esta manera, y la ubicación dentro de ella de nuestro sistema solar fue la adecuada como para que reinara la paz astronómica durante el tiempo necesario como para que nuestro Sol evolucionara sin sobresaltos, y sus rayos benéficos pudiesen mantener y ayudar a desarrollar la vida naciente en nuestro planeta Tierra.

Pues sabemos que la biosfera de nuestro planeta es única en todo nuestro sistema solar y es el resultado de miles de millones de años de paulatinas modificaciones y de evolución hacia lo que es hoy. Constituyó un campo propicio donde comenzaron a evolucionar las primeras moléculas orgánicas complejas, sobre las que luego se construyó la vida que pobló todos los rincones de la Tierra.

Pero la vida en nuestro planeta jamás abandonó completamente sus orígenes cósmicos, ni su relación y dependencia con sus vecinos astronómicos. Y es así que la Tierra –como también los demás planetas del sistema solar– sufrió frecuentes impactos de asteroides y cometas, que pusieron a prueba su capacidad de restablecer el frágil equilibrio de la vida. Vida que perduró –adaptándose– desde sus más lejanos orígenes y que incluso experimentó notables períodos de florecimiento, como la famosa explosión cámbrica de hace unos 530 millones de años, cuando se produjo, aparentemente a partir de organismos simples en medios acuáticos, un rápido desarrollo de invertebrados complejos con partes duras (precursoras de las conchillas calcáreas externas), y que lanzó una carrera evolutiva sin precedentes.

■ Un futuro deseado: la gran unificación de toda la física

Uno de los sueños jamás realizados de Einstein fue lograr la unificación formal de las leyes de la física. Inicialmente se trataba de amalgamar solo las teorías del electromagnetismo y de la gravitación. Para ello, se vio que era necesario trabajar en más dimensiones que las tres usuales para el espacio y una para el tiempo: se precisaban cinco dimensiones del espacio-tiempo (cuatro para el espacio y una para el tiempo) para incorporar el electromagnetismo a la relatividad general.

Pero con el tiempo, la mecánica cuántica se desarrolló al punto de convertirse en la teoría más precisa jamás desarrollada para describir el reino subatómico. Junto con ella

surgieron nuevas fuerzas físicas: la interacción nuclear débil y la fuerte. Así, la idea de unificar todas estas interacciones se volvió más ardua. Si la unificación de la física de los albores del siglo XX logró esquivar los intentos de Einstein y de sus contemporáneos, la física actual no es menos reacia a dejarse encasillar en un marco teórico adecuado.

Esta dificultad en lograr la descripción armoniosa y unificada de la física aún perdura. Al día de hoy no han sido resueltas ciertas inconsistencias matemáticas que surgen a la hora de hacer interactuar partículas puntuales entre sí. De los cálculos, que para ser precisos aumentan en dificultad asombrosamente, surgen cantidades infinitas, las cuales no representan lo que se observa en los experimentos.

Hace algunos años, se descubrió que estas inconsistencias matemáticas podían resolverse si en lugar de trabajar con partículas puntuales (que poseen dimensión cero) se trabajaba con objetos unidimensionales, como cuerdas muy finas. Pero estas cuerdas que proponen los físicos no están compuestas de átomos y de moléculas, sino tan sólo de espacio-tiempo (y sus dimensiones características se hallan en la frontera inasible donde los reinos de la relatividad clásica y la mecánica cuántica deberían amalgamarse, alrededor de los 10^{-33} cm, la escala de Planck). De hecho, son las vibraciones de estas "cuerdas fundamentales" (como se las conoce en la jerga de la física teórica) las que generan todo el menú de partículas elementales que conocemos en la actualidad.

Estos, y otros desarrollos que vinieron en los últimos años, constituyen la descripción matemática más promisoria de la actualidad para describir el universo físico que nos rodea. Claro, hay un precio que pagar: para que estas cuerdas representen en efecto la física conocida, el espacio-tiempo en donde viven (y donde vivimos todos nosotros) debe contener 10 dimensiones espacio-temporales (a veces se consideran membranas, con un número mayor de dimensiones, y en ese caso el requerimiento es 11 dimensiones para el espacio-tiempo). En otras palabras, nuestro universo no tendría sólo tres dimensiones espaciales y una temporal (un espacio-tiempo de cuatro dimensiones) sino que sería mucho más complejo. Y habría dimensiones espaciales (muchas más que tres) a las que no tendríamos acceso.

Veamos un ejemplo de lo que esto significa. Imaginemos una manguera para regar las plantas, pero vista desde muy lejos. En esta situación no llegamos a distinguir el grosor de la manguera y tan sólo vemos una línea. En lugar de ver las tres dimensiones (o las dos dimensiones, si miramos una fotografía de la manguera) tan sólo veremos una única dimensión, la línea. Para observar la manguera como realmente es, debemos acercarnos y mirarla de cerca. En el caso de los experimentos con aceleradores de partículas, eso es precisamente lo que se hace. Pero en lugar de acercarse a lo que se quiere mirar, se lo somete a un bombardeo de partículas de muy alta energía. Energías muy altas permiten ver con detalle lo muy pequeño. En el caso de querer develar la posible existencia de un número muy grande de dimensiones espaciales, debemos alcanzar energías altísimas, (comparables a las energías características de la escala de Planck). A las energías caracte-

rísticas de nuestro universo conocido en la actualidad, no vemos las "dimensiones suplementarias" (por encima de las tres conocidas); la teoría predice que se hallan "enrolladas" en tamaños tan reducidos que sólo un acelerador de partículas como el Large Hadron Collider (LHC) del CERN –cuyos resultados se aguardan con impaciencia– será capaz de revelarlas. Mencionaremos más detalles del LHC en lo que sigue de este libro.

Pero hay ciertas proposiciones de los físicos teóricos que serán por el momento muy difíciles de comprobar en la práctica. Una de estas ideas, y quizás la más osada, es la que sugiere una explicación para el "inicio" de nuestro universo, elemento fundamental que los actuales modelos del Big Bang no son capaces de explicar fehacientemente. Investigaciones realizadas por Steven Hawking y colaboradores en la década de 1960 mostraron que todos los universos embrionarios que luego evolucionan para convertirse en universos como el nuestro contienen una "singularidad espacio-temporal" en su inicio. Una singularidad en este contexto se refiere a un evento espacio-temporal en el que el espacio-tiempo se "desgarra", la temperatura del cosmos se dispara al infinito y las curvaturas del espacio son tan pronunciadas que la física conocida ya no es más idónea para explicar la realidad física. Surgió, entonces, la teoría de las branas (generalizaciones a un número arbitrario de dimensiones de las membranas fundamentales) y con ella la idea ambiciosa de que el origen del cosmos se debió, ni más ni menos, al colapso catastrófico de dos branas (o universos paralelos) que se movían libremente por un espacio-tiempo de dimensionalidad mayor al nuestro.

Dichas branas, previas a la creación de nuestro universo, se movían en un tiempo que no guardaba relación alguna con nuestro tiempo. Surge entonces la pregunta: ¿qué es, en verdad, el tiempo? Es sabido que cuestionamientos similares a este, ya se los hacía San Agustín hace varios siglos, y hoy nosotros nos vemos forzados a responder con sus mismas palabras: "Si nadie me lo pregunta, lo sé; si trato de explicarlo a quien me lo pregunta, no lo sé". Habría sido entonces ese "colapso creacional" de branas fundamentales el que inyectó la energía suficiente para motorizar la expansión del cosmos, que aún hoy –casi 14.000 millones de años más tarde– podemos verificar a través de nuestros grandes telescopios. ¿Suena como una idea asombrosa? ¿O quizás fantasiosa? Como decimos siempre: ¡la ciencia de punta siempre resulta ser mucho más extraña que lo que puede imaginar el mejor escritor de ciencia ficción!

● GeV es una unidad de energía llamada Giga electron-Volt, y corresponde a 10^9 eV. Mev es Mega electron-Volt, o sea 10^6 eV. Un "eV" es la energía que adquiere un electrón al ser acelerado en el campo eléctrico de 1 Volt. La equivalencia entre materia y energía de la relatividad especial, $E = m c^2$, nos permite expresar los GeV en unidades de masa, por ejemplo, colocando a la velocidad de la luz (c) igual a uno. En este caso tenemos, 1 GeV = $1{,}8 \times 10^{-24}$ gramos. De manera análoga, y dado que la temperatura es una forma de energía, podemos también establecer la equivalencia: 1 GeV = $1{,}2 \times 10^{13}$ K, donde K es Kelvin, la unidad de la escala absoluta de temperaturas, donde el cero absoluto, o cero kelvin, corresponde a 273,15 grados por debajo del punto de congelamiento del agua.

• Tabla: Una breve historia del universo

ÉPOCA	TIEMPO	TEMPERATURA	EVENTOS FÍSICOS	VESTIGIOS Y OBSERVABLES
Época de Planck	10^{-43} seg.	10^{19} GeV	Límite del espacio-tiempo clásico: teoría de Membranas, supercuerdas, gravedad cuántica, etc.	Espacio-tiempo cuadridimensional. Fondo cosmológico de ondas gravitacionales.
Inflación cósmica	10^{-35} seg.	10^{14} GeV	Dominación de campos primordiales (inflatón). Fluctuaciones cuánticas en el campo del inflatón.	Tamaño y propiedades geométricas del universo observable. Semillas primordiales de las grandes estructuras.
"Creación de la luz"	10^{-35} seg.	10^{14} GeV	Conversión de la energía de vacío del inflatón en partículas elementales y radiación.	La radiación domina la expansión del universo.
"Creación de la materia"	10^{-35} seg.	10^{14} GeV	Ligero desequilibrio en favor de la abundancia de materia.	Actual dominación de la materia sobre la anti-materia.
Gran "desierto"	10^{-35} seg. a 10^{-12} seg.	10^{14} GeV a 1.000 GeV	¿Supersimetría?	Partículas "supersimétricas" podrían detectarse en aceleradores (materia oscura).
Era electrodébil	10^{-12} seg.	10^{15} K (100 GeV)	Unificación electrodébil. Al descender la temperatura, separación de fuerzas electromagnética y nuclear débil.	Las partículas elementales adquieren masa. Surge el electromagnetismo.
Era hadrónica	10^{-4} seg.	10^{12} K	Quarks quedan confinados. Se forman los hadrones (protones, neutrones, etc.).	Masas y cargas de partículas actuales. Formas exóticas de materia oscura.
Desacoplamiento débil	1 seg.	10^{10} GeV	Los neutrinos cosmológicos dejan de interactuar con el plasma primordial.	Existencia de un fondo cosmológico de neutrinos a una temperatura de 2K.
Aniquilación electrón-positrón	5 seg.	0,5 MeV (la masa del electrón), o 5 x 10^9 K	Energía de la aniquilación termina calentando a los fotones de la radiación (pero no a los neutrinos).	Radiación cósmica del fondo de microondas a 2,7K es más caliente que el fondo de neutrinos.
Nucleosíntesis primordial	3 min.	10^9K (característica de la energía de ligadura de los núcleos más livianos)	Formación de los núcleos atómicos más livianos.	Abundancias observables de los elementos más livianos: Helio-3, Helio-4, Deuterio, Litio...
Igualdad entre materia y radiación	50.000 años	9.500 K	Igualdad de las densidades de la materia no-relativista y de la radiación.	La materia comienza a dominar la expansión del universo. Materia no-bariónica se aglutina y cataliza la formación de grandes estructuras astrofísicas.
Recombinación/ desacoplamiento	380.000 años	3.000 K	Formación de átomos de la materia neutra (átomos de hidrógeno). Universo transparente a la radiación.	Fluctuaciones en la temperatura y en la polarización de la radiación cósmica de fondo.
Fin de las "eras oscuras"	< 200 millones de años	> 60 K	Crecimiento de las inhomogeneidades iniciales en la materia por inestabilidad gravitacional. Reionización del universo.	Formación de las primeras estrellas. Modificación en la temperatura y polarización de la radiación de fondo.
Formación de galaxias	> 500 millones de años	< 30 K	Formación de sistemas galácticos. Generación de elementos pesados. Colapso de estrellas.	Estrellas, galaxias, cúmulos galácticos. Estrellas colapsadas, agujeros negros, quásares. Abundancia de elementos pesados. Sistemas planetarios.
Época actual	14 mil millones de años	2,7 K	El universo está dominado por una forma desconocida de "energía oscura".	La materia se estructura a pequeñas y medianas escalas. El universo se expande en forma suavemente acelerada a grandes escalas astrofísicas.

Actividad 2: El tiempo de Planck

Dos de los grandes edificios intelectuales de la física del siglo XX fueron la relatividad general de Einstein y la teoría cuántica. Ambos marcos teóricos fueron concebidos en las primeras décadas del siglo pasado y, con el paso del tiempo, fueron sujetos a cada vez más precisas y detalladas observaciones y experimentos. Estos últimos les han dado a ambas teorías el estatus que hoy tienen y las convierten en verdaderos modelos de la realidad. Claro que los dominios de aplicación de ambas teorías son diferentes. La teoría cuántica es el marco teórico más adecuado para la descripción del mundo microscópico, el reino subatómico cuyos fenómenos se ponen a prueba en experimentos de muy altas energías de grandes aceleradores de partículas, como así también en el caso de los rayos cósmicos de energías extremas que llegan a la atmósfera de la Tierra. Por su parte, la relatividad general es la teoría apropiada para la descripción de la gravitación, interacción que rige el movimiento planetario y, como también hemos visto, la estructura y características a grandes escalas astronómicas del universo observable. Así es que los dominios de aplicación son aparentemente diferentes. Uno podría, perfectamente, conformarse con emplear una u otra teoría de acuerdo al problema físico que tenga entre manos. Sin embargo, existen áreas de la física donde ambas teorías claman por su lugar, donde ambas teorías deberían poder ser usadas para lograr una adecuada descripción de la realidad. Casos paradigmáticos son el estudio de los agujeros negros, zonas del espacio-tiempo donde la gravitación es tan intensa que el espacio se "curva" de tal manera que prohíbe a las partículas (materiales o de radiación) escapar hacia el exterior. Procesos de micro-física que toman lugar en el interior y en la frontera (horizonte de eventos) de estos objetos astrofísicos precisan ser descriptos por la teoría cuántica, además de por la relatividad. Otro ejemplo notable, es la descripción del estado embrionario de nuestro universo en evolución. Sabemos que en la descripción de nuestro universo se precisa emplear la relatividad general. Sin embargo, en épocas muy primigenias, cuando el universo era muy diferente del que vemos hoy; cuando las densidades y temperaturas que lo caracterizaban eran excesivamente superiores a las actuales, las interacciones de partículas, descriptas por la teoría cuántica eran muy frecuentes. La descripción completa de ese sistema físico (el universo) precisa entonces un tratamiento cuántico. El problema radica en que ambas teorías aún no congenian adecuadamente entre sí: aún no existe una adecuada "teoría cuántica de la gravedad" que pueda dar cuenta de esos problemas físicos de frontera donde ambos marcos teóricos deben ser usados.

La teoría de Einstein describe las interacciones gravitacionales, aquellas que durante más de 200 años eran adecuadamente descriptas por la teoría de Newton. De hecho, la teoría general de la relatividad "se reduce" a la teoría newtoniana, por supuesto, en el límite adecuado. En los problemas en los que los campos gravitatorios son débiles y las

velocidades de los objetos son lentas, comparadas con la velocidad de la luz, allí ambas teorías de la gravitación van juntas (no podemos decir que den exactamente el mismo marco teórico, el mismo resultado para las predicciones, pues sutiles diferencias siempre hay, pero describen en forma muy similar la física en juego). No resultará sorprendente, entonces, que la famosa "constante de Newton", "G", aquella que caracterizaba la interacción gravitatoria en la teoría de Newton, esté también presente –¡en forma prominente, además!– en la teoría de Einstein. Esta última teoría, a diferencia de la newtoniana, otorga un papel sumamente importante a la velocidad de la luz, "c". Recordemos que, para la teoría newtoniana, la velocidad de propagación de la interacción era infinita; vale decir que la interacción era "instantánea". Para la teoría de Einstein, la propagación de cualquier interacción tiene un valor límite, dado por "c". La interacción no es instantánea y existe una clara causalidad en los fenómenos físicos: causa y efecto están bien definidos.

Por el lado de la teoría cuántica, debemos mencionar que una cantidad clave de la teoría es la llamada "constante de Planck". Esta constante, notada con la letra "h", describe el tamaño de los cuantos de energía característicos en todos los procesos de la física subatómica. De acuerdo con los trabajos de Max Planck, la energía involucrada en procesos físicos no puede tomar un valor arbitrario. La energía intercambiada en dichos procesos debe ser el múltiplo de una cantidad muy pequeña (que más tarde se llamó "quantum"). Aunque la vida cotidiana nos ha acostumbrado a que podemos regular la energía de los objetos en forma tal que llamaríamos "continua", y por lo tanto la "cuantización" no nos resulta evidente, los experimentos muestran que la realidad se comporta como lo indican las leyes de la teoría cuántica. La energía que posee un corpúsculo de radiación, la energía de vibración de una molécula, etc., todas estas energías están cuantizadas. Esto quizás resulta antiintuitivo, pues estos cuantos de energía son excesivamente pequeños, si se los compara con la energía involucrada en cualquier acción de la vida diaria.

De todo lo discutido, podemos deducir que habrá tres cantidades importantes que caracterizan aquellos problemas donde, tanto la relatividad como la cuántica deben ser tenidas en cuenta. Reiteremos que "c" no es relevante para estudiar el movimiento de cuerpos en nuestro sistema solar (tómese esto con una pizca de sal), ni "h" es relevante para estudiar el movimiento de un camión por la calle. Ahora bien, cuando ese camión se reemplaza por un electrón, y ese sistema solar se reemplaza por un objeto astrofísico muy compacto, como un agujero negro, las tres cantidades G, h y c, se vuelven necesarias. Lo mismo sucede en épocas ultratempranas de la vida de nuestro universo.

Es por ello que la combinación de estas cantidades, con sus valores numéricos y sus "dimensiones" (por ejemplo, "c" viene dada en –aproximadamente– 300.000 kilómetros por segundo), puede ser empleada para caracterizar "tiempos" o "distancias", o bien cantidades de "masa-energía" en los cuales una teoría combinada de relatividad y mecánica cuántica –por el momento inexistente– se hace necesaria.

Con los datos que colocamos a continuación, ¿es posible deducir algunas cantidades

–de tiempo, de masa o de longitud– que involucren solamente las constantes G, h y c? Tratar de expresar, en términos personales, ¿qué significan esas cantidades deducidas?

Constante	Símbolo	Dimensión	Valor
Velocidad de la luz en el vacío	c	$L\ T^{-1}$	299.792.458 m/s
Constante de la Gravitación	G	$L^3\ M^{-1}\ T^{-2}$	$6{,}674 \times 10^{-11}\ m^3\ kg^{-1}\ s^{-2}$
Constante de Planck	h	$L^2\ M\ T^{-1}$	$2\ \Pi \times 1{,}054 \times 10^{-34}$ Js

Aquí las dimensiones son: T = tiempo; M = masa; L = longitud.

Respuestas - Actividad 2:

Con tan sólo estas tres cantidades, y sin olvidarnos de ninguna, al combinarlas y construir cantidades con unidades de tiempo, longitud y masa-energía, obtenemos lo siguiente:

Tiempo de Planck

$$t_P = \sqrt{\frac{hG}{2\Pi c^5}}$$

$t_P = 5{,}391 \cdot 10^{-44}$ s, aproximadamente 10^{-43} s

Longitud de Planck

$$l_P = \sqrt{\frac{hG}{2\Pi c^3}}$$

$l_P = 1{,}616 \cdot 10^{-35}$ m, aproximadamente $2 \cdot 10^{-33}$ cm

Masa de Planck

$$m_P = \sqrt{\frac{h.c}{2\Pi G}}$$

$m_P = 2{,}176 \cdot 10^{-8}$ kg, aproximadamente $2 \cdot 10^{-5}$ gramos

Actividad 3:

¿Qué significan estas cantidades? Son esencialmente cantidades características donde las tres constantes "G", "h" y "c" juegan un papel relevante. Por lo tanto, estas cantidades no pueden caracterizar ningún fenómeno típico de la teoría de Newton, pues allí "c" y "h" no son relevantes. De igual modo, no pueden representar ningún fenómeno de la relatividad clásica (es decir, no cuántica) de Einstein, pues en dicha teoría "h" no juega ningún rol.

En base a estos valores para el tiempo, la longitud y la masa de Planck: ¿Es posible dar una idea de los límites de las teorías conocidas hoy en la física teórica? ¿Tiene sentido decir que la cosmología explica el origen del universo? ¿Cuál es el tiempo más pequeño para el cual tiene sentido decir algo científicamente correcto en cosmología? Si un físico teórico nos dice que, en realidad, el espacio no es continuo, sino "granuloso" (como los *pixels* de una foto digital, que sólo se hacen evidentes cuando aumentamos muchísimo la imagen): ¿A partir de qué distancias características podría llegar a ser cierta su afirmación? Con lo que vimos hasta ahora, ¿una idea tal podría llegar a ponerse a prueba en el corto plazo?

Respuestas - Actividad 3:

Los valores deducidos para las constantes de Planck nos indican los límites de la teoría cuántica y de la teoría de la relatividad general de Einstein. Por debajo del tiempo de Planck no hay manera –con las teorías actuales– de decir nada científico, pues es un dominio donde las teorías no se aplican. Deducimos entonces que estamos lejos de poder explicar el tiempo cero, el supuesto origen del universo (si tuvo origen). Asimismo, querer decir algo sobre la verdadera estructura del espacio-tiempo, es decir, si el espacio-tiempo es en realidad continuo ad infinitum, o si en alguna escala microscópica llegaremos a detectar sus “pixels” característicos, requiere contar con una buena teoría cuántica de la gravedad (que explique la verdadera estructura del espacio-tiempo). Por el momento, tal teoría no existe. Por encima de la longitud de Planck, el espacio resulta continuo en una muy buena aproximación; por debajo de esta longitud, aun está abierto el debate.

¿Cómo poner a prueba estas ideas? En estas escalas de energía cualquier acelerador de partículas que pueda diseñar el hombre en el futuro imaginable parece ser insuficiente. Por ello, quizás es mejor mirar hacia el cielo: el universo nos ofrece procesos astrofísicos increíblemente energéticos, que un buen observador debería ser capaz de aprovechar. Como le gustaba afirmar a un conocido cosmólogo ruso, “el universo es el acelerador de los pobres”. y cuando se quiere llegar a la escala de Planck, todos lo somos.

EN RESUMEN

Una "teoría cuántica de la gravedad" será la única que servirá para describir el universo en la llamada "época de Planck", donde con este nombre denotamos aquellos instantes en los que la teoría de la relatividad general de Einstein y la mecánica cuántica deben combinarse armoniosamente para describir la realidad. En la época de Planck, nuestro universo contaba aproximadamente con tan sólo una parte en 10^{43} segundo de vida, esto es 0,0000000000000000000000000000000000000000001 de segundo luego de la "singularidad", donde hay 42 ceros luego de la coma decimal. Debemos reconocer que, si bien se han hecho avances importantes en estos últimos años, por el momento tal teoría es inexistente.

"Libro de las Estrellas Fijas" (Al-Sufi)

Capítulo 3

Universo en expansión

Retomemos ahora lo que mencionamos brevemente en capítulos pasados sobre nuestro universo en expansión. Todo comenzó en 1929, cuando la comunidad científica se vio sorprendida por un descubrimiento excepcional. Basándose principalmente en las observaciones recopiladas por el astrónomo Vesto Melvin Slipher (1875-1969), Edwin Hubble pudo mostrar que, en forma sistemática, todas las galaxias observadas (que en aquella época eran llamadas nebulosas) poseían un movimiento de alejamiento con respecto al observador (con respecto a nuestra ubicación en la Tierra) y que, cuanto más lejos estaban, más rápido se alejaban de nosotros.

Este fue un resultado inesperado, que luego se convertiría en un pilar básico de los modelos del Big Bang. Surgió de la observación cuidadosa de los corrimientos al rojo de la emisión electromagnética de galaxias y estrellas. Veamos, entonces, en primer lugar, qué información nos llega con la luz estelar, y cómo esta luz se modifica con la expansión del universo. Luego, veremos cómo estos indicios llevaron a los cosmólogos a construir un nuevo puente entre las observaciones y la teoría de la relatividad general; un lazo fecundo que jamás se habría de destruir.

■ El corrimiento al rojo de la luz

La radiación electromagnética puede descomponerse en su gama intrínseca de colores (o longitudes de onda), llamándose espectro al resultado de dicha descomposición cromática. La luz que recibimos de las galaxias y estrellas revela los elementos químicos predominantes en estos sistemas astrofísicos a través, precisamente, de su espectro. De acuerdo con la teoría cuántica, iniciada por el físico Max Planck (1858-1947) hace algo más de cien años, los átomos poseen estados de energía discretos. Se dice que la energía del átomo está cuantizada. Sólo luz que llegue con la energía justa, correspondiente a la diferencia energética entre dos niveles cualesquiera, será absorbida por el átomo, que entonces pasará a un nivel energético superior (átomo excitado). Pero ésta es una situación inestable pues, de manera idéntica a cómo cae al suelo un objeto tratando de reducir su energía potencial gravitatoria, el átomo también buscará minimizar su energía y entonces se desexcitará en un tiempo más o menos corto. Para hacerlo, emitirá el excedente de energía en forma de un fotón, una cantidad discreta o cuanto de luz, en cualquier direc-

ción espacial, y no necesariamente en la misma dirección del fotón que lo excitara inicialmente.

Pensemos ahora en lo que sucede en el interior de una galaxia. Aquellos átomos de los elementos químicos muy abundantes en ella, interceptarán la radiación que emite la galaxia. Luego, los fotones de esta radiación con la energía justa correspondiente a la diferencia de niveles de estos elementos químicos (que, recordémoslo, es característica de cada elemento particular) se dispersarán y no podremos detectarlos. Pero, nuevamente, en la teoría cuántica la energía de un fotón está relacionada con su color, siendo tanto más energético cuanto menor es su longitud de onda (en el rango visible, cuanto más "hacia el violeta" está corrido su color). Así, en la posición del espectro correspondiente a esta longitud de onda, faltará luz, y entonces este espectro contendrá líneas oscuras o de absorción.

Entonces, se pueden comparar en el laboratorio aquellas líneas características de las galaxias con las de los elementos químicos conocidos. Pero el ejercicio no termina ahí. De nuestra experiencia diaria, sabemos que el sonido de una fuente cambia dependiendo del estado de movimiento relativo entre la fuente y quien escucha: así, para los pasajeros de un tren, el sonido de la sirena es siempre el mismo, mientras que para los que esperan en la estación, el sonido será más agudo (alta frecuencia) cuando el tren se aproxima y más grave (baja frecuencia) cuando éste abandona el lugar. Tanto el sonido como la luz "son ondas", esto es, pueden ser descriptas matemáticamente en términos ondulatorios. Entonces se podría preguntar, naturalmente, si algo similar debería suceder con la luz de las estrellas y galaxias. La respuesta es afirmativa y este cambio en la frecuencia de la luz, debido al movimiento, fue explicado a mediados del siglo XIX y se conoce con el nombre de "efecto Doppler-Fizeau".

El efecto Doppler-Fizeau y la recesión de las galaxias lejanas

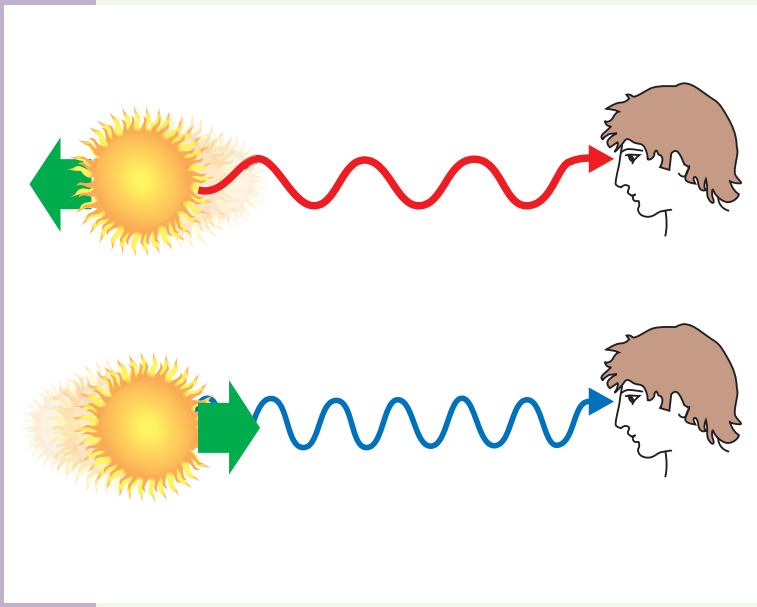
Sabemos que existen diferencias entre los dos tipos de onda que mencionamos más arriba. Las ondas acústicas son perturbaciones de densidad y de presión en el aire u otro material (como en las vías del tren, por ejemplo) y precisan de un medio para propagarse, esencialmente como choques entre las moléculas del gas. Por su parte, la luz se propaga tanto en el vacío como en otros materiales, en forma de perturbaciones del campo electromagnético. Dicho esto, y a pesar de las importantes diferencias entre las ondas acústicas y las electromagnéticas, los efectos cualitativos de dos fuentes en movimiento relativo son similares. Así, las líneas espectrales de la luz de las estrellas que se alejan de la Tierra nos llegarán modificadas, con sus frecuencias disminuidas con respecto a aquellas que

detectaríamos en un laboratorio en donde fuente y observador (como el pasajero dentro del tren) se hallan en reposo relativo.

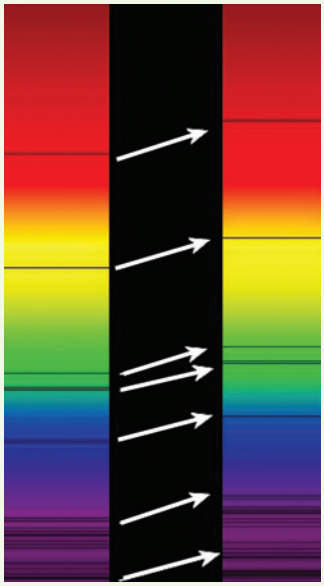
Luego de un arduo trabajo de observación, Slipher había puesto en evidencia un corrimiento hacia el rojo (hacia las bajas frecuencias) casi sistemático de las líneas espectrales de las galaxias. Como adelantamos, el efecto Doppler-Fizeau explica este corrimiento como debido a una velocidad de recesión. En efecto, el austríaco Johann Christian Doppler (1803-1853) y el francés Armand-Hyppolyte Fizeau (1819-1896) descubrieron (en 1842 el primero, e independientemente en 1848 el francés) la correcta "ley de variación" de la longitud de onda de una fuente emisora de radiación, en función de la velocidad relativa entre ésta y el observador. Es así, que este efecto permite a los astrónomos medir la velocidad radial "de fuga" de las estrellas y galaxias lejanas por métodos espectrográficos. Cuanto mayor es esta velocidad, mayor será el corrimiento, y entonces, de la comparación de las líneas espectrales, se deduce el sentido y la magnitud de la velocidad radial de la galaxia: un corrimiento hacia el rojo de todo el espectro de la galaxia indica que ésta se aleja, un corrimiento hacia el azul, por el contrario, indica un acercamiento relativo.

Con lo que acabamos de explicar, se podría terminar pensando que el corrimiento al rojo de la luz de las galaxias es "exactamente" debido al efecto Doppler-Fizeau. Pero esto no es así. Lo que acabamos de ver sí sería válido para un universo estático, en donde las galaxias se mueven con una cierta velocidad de alejamiento de nosotros. Pero la cosmología no es eso, y la realidad de la relatividad general es algo más sutil. Como veremos en pocas líneas más, la expansión cosmológica no es el movimiento de las galaxias en el espacio, sino la expansión del espacio mismo que "arrastra" a las galaxias. Esto cambia radicalmente la interpretación de los corrimientos espectrales, los que se deducen de las ecuaciones cosmológicas de la relatividad general. Sólo para velocidades de recesión mucho menores que la velocidad de la luz (velocidades típicas de las galaxias estudiadas por Slipher y Hubble, por ejemplo) el corrimiento al rojo cosmológico coincidirá con la ley del efecto Doppler-Fizeau, y la descripción que acabamos de ver se aplicará.

Volviendo ahora a las observaciones, con unas pocas excepciones, todas las galaxias observadas por Slipher se alejaban de nosotros. Lo que Hubble descubre es que, además, aquellas galaxias de luminosidad más débil (más distantes) se alejaban más rápidamente. Con este nuevo descubrimiento de expansión global, que conocemos hoy bajo el nombre de "ley de Hubble", el gran astrónomo lograba demostrar que, a las mayores escalas de la época –escalas de distancias intergalácticas y superiores– existía un movimiento regular y coordinado de expansión del universo.



● Ilustración del efecto Doppler-Fizeau. La luz que recibimos de una fuente que se aleja de nosotros nos llega corrida hacia el rojo, es decir hacia las bajas frecuencias del espectro electromagnético. Una fuente que se acerca al observador, por el contrario, muestra luz con sus líneas características desplazadas hacia el azul, es decir, hacia las altas frecuencias del espectro.



● El corrimiento espectral de líneas correspondientes al rango visible de la radiación electromagnética (luz visible). Cuanto mayor es la velocidad de recesión de la fuente emisora, mayor será el desplazamiento de las líneas características del espectro.

El descubrimiento de Hubble fue puramente empírico y surgido de la observación. En el plano teórico, sin embargo, se convertía en un nuevo "misterio" a elucidar, pues la idea general de la época era que nuestro universo debía ser estático (sin evolución y siempre igual a sí mismo).

Precisemos que las pocas excepciones detectadas por Slipher, y a las que nos referimos más arriba, hoy sabemos que se deben a movimientos peculiares entre galaxias cercanas. Pues, si bien la expansión universal "arrastra" y tiende a separar a los miembros del grupo, una galaxia cualquiera (como la nuestra, por ejemplo) atrae gravitatoriamente a sus vecinas. Esta "atracción gravitatoria" es el producto de la deformación del espacio-tiempo en nuestra cercanía, que hace que las galaxias vecinas caigan en nuestro "pozo gravitatorio". Cuando esta caída es mayor que la expansión global del universo (generalmente para objetos relativamente cercanos en estándares astronómicos) se detectará, como Slipher lo hiciera en ciertos casos, un corrimiento de la luz hacia el azul.

■ Aleksandr Friedmann

En la sección anterior vimos que las observaciones astronómicas habían dado con un

resultado insospechado, el de la recesión de galaxias y estrellas lejanas. Ese era el estado de la situación observacional que, sin una adecuada justificación teórica, distaba mucho de ser satisfactorio. Sin embargo, no toda la acción se desarrollaba al lado de los telescopios. En el plano teórico había también grandes descubrimientos, que incluso precedieron a los observacionales. Dirigiremos ahora entonces nuestra atención a San Petersburgo y a los trabajos de Aleksandr Friedmann. Fue él quien por primera vez encontró soluciones cosmológicas "dinámicas" a las ecuaciones del campo gravitatorio de la relatividad general.

Friedmann (1888-1925) se gradúa en 1910 en la especialidad Física-Matemática de la universidad de San Petersburgo. Pero su carrera se ve rápidamente interrumpida por el inicio de la Primera Guerra Mundial, período durante el cual participa como experto en balística en misiones aéreas de la armada rusa. El fin de la guerra le permite retomar sus actividades académicas y así, entre 1920 y 1924, ejerce como profesor en la universidad. Precisamente en este período Friedmann se volcará a estudiar la teoría de la relatividad general.

Matemático de formación, Friedmann emplea la relatividad general de Einstein para describir el universo. Sus dos trabajos fundamentales datan de 1922 y 1924, y en ellos se describe la posibilidad de un universo dinámico, contrariamente a la idea de "estaticidad" que reinaba por la época.

Notemos que la concepción filosófica de un universo "estático y eterno" estaba tan enraizada en las mentes de los hombres de ciencia, que el mismo Einstein modificó su teoría original en febrero de 1917 para incluir un término adicional que se opusiera a la evolución, y que permitiera la existencia de un universo estático y siempre idéntico a sí mismo. Este término era esencialmente su famosa constante cosmológica, bautizada con la letra griega Lambda, que actuaba como una energía "repulsiva", contrarrestando así la tendencia de la materia ordinaria a atraerse gravitatoriamente y hacer colapsar el universo.

Dicho así, esto podría parecer un poco simplista. En realidad Einstein fue más pragmático y quiso dar una representación fiel de lo que se sabía en su época en materia de astronomía. Tan sólo un año y meses después de presentar su teoría completa ante la Academia Prusiana de Ciencias el 25 de noviembre de 1915, Einstein, en 1917, explora las consecuencias de la relatividad general para el universo en su totalidad. En su trabajo, titulado "*Consideraciones Cosmológicas sobre la Teoría General de la Relatividad*", Einstein modifica (generaliza) sus ecuaciones, agregando el término Lambda que, como él mismo confesara, era un parámetro ad hoc en la teoría, pero que resultaba "necesario para obtener una distribución cuasi-estática de materia, lo que corresponde al hecho de que las velocidades de las estrellas son pequeñas".

Por otra parte, la interpretación de Lambda como un término de "energía repulsiva" no fue de Einstein, sino que llegó más tarde, con los trabajos del astrofísico ruso Yakov Zel'dovich. Para Einstein, Lambda tenía un origen físico diferente, no ligado a la materia o a la energía, sino a la estructura misma del espacio, de allí su calificativo de "cosmoló-

gico". Hoy, es útil pensar a esta constante como un término repulsivo que resulta proporcional a la distancia, siendo completamente irrelevante a pequeñas escalas, como la de nuestro sistema solar, donde no se evidencia, para hacerse cada vez más importante a escalas cosmológicas, comparables con el tamaño observable de nuestro universo, como en efecto veremos más adelante. Nos estamos refiriendo al estado dinámico actual de nuestro universo, donde una cantidad sorprendentemente grande de "energía oscura" parece dominar sobre la materia-energía ordinaria y producir una expansión suavemente acelerada, en contra de toda expectativa "razonable".

Pero a diferencia de Einstein, los trabajos de Friedmann no estaban constreñidos por las observaciones astronómicas ni por una visión filosófica rígida, y es así que su análisis le lleva a descubrir la existencia de una rica dinámica para el "tamaño del universo". (Esta es una cantidad que Friedmann denomina "radio de curvatura" pero que actualmente se conoce como "radio" del universo, claro está, siempre y cuando el universo sea finito –léase bien, decimos "finito" y no "con borde": la superficie de una esfera, por ejemplo). Friedmann nos habla, incluso, sobre algo que nunca antes había pasado por la mente de los cosmólogos: la existencia de un posible estado primordial singular, donde este radio (y con éste, el tamaño del universo) se anularía.

En su libro de divulgación científica "*El Mundo como Espacio y Tiempo*", publicado en el año 1923, Friedmann escribe: "El tipo de universo variable genera una familia mucho más general de modelos: en ciertos casos el radio de curvatura del universo parte de un cierto valor y aumenta constantemente en el curso del tiempo; en otros casos el radio de curvatura varía en forma periódica, con el universo contrayéndose en un punto (de volumen nulo) para después, a partir de ese punto, aumentar hasta un cierto valor máximo, después disminuyendo de nuevo para redevenir un punto, y así por siempre." Este corto fragmento nos alcanza para entender que, aún cuando su motivación inicial para trabajar con la relatividad de Einstein había sido la belleza y consistencia matemáticas de la nueva teoría, no por ello Friedmann dejaba de apreciar las consecuencias que las soluciones por él halladas tenían para el universo.

En sus trabajos aparece mencionada por primera vez una situación que daría tema de discusión a generaciones de matemáticos y cosmólogos por décadas: el problema de las "singularidades en cosmología". Este problema surge de la imposibilidad de plantear una descripción coherente del cosmos cuando el radio del universo se anula y éste (en el decir de Friedmann) se ve reducido a tan sólo un punto. Hoy sabemos que en este caso, ciertas cantidades físicas relevantes, como por ejemplo la curvatura, la densidad de energía y la temperatura del universo, se hacen infinitas. Luego, la descripción física dada por la relatividad general "se quiebra" y se revela impotente.

Sólo una teoría aún más general, y que incorpore los conceptos de la mecánica cuántica, podrá explicar el estado del universo en esos casos extremos. Pero Friedmann reconoce el problema y menciona: "Podemos recordar aquí la mitología india sobre los ciclos

de la vida, podemos también hablar de la creación del mundo a partir de la nada." Este breve comentario filosófico, entre las líneas de un texto de cosmología relativista, restaría tan sólo una simple sombra comparado con las discusiones que sobrevendrían en los años a venir; nos referimos a las discusiones futuras sobre la relación entre la ciencia y la creación del universo. Notemos además que en esa época de dictadura ideológica, con Stalin a la cabeza del partido comunista, hablar sobre la creación del universo no era de lo más "políticamente correcto", sobre todo para Friedmann, que de política no se había preocupado nunca.

En síntesis, uno de los méritos a destacar de su libro, fue haberse planteado científicamente -y por primera vez- la difícil pregunta sobre si la creación del universo podía evidenciarse a partir de la solución de las ecuaciones de la relatividad general. Vemos que Friedmann era consciente de las implicaciones cosmológicas de sus soluciones dinámicas, las primeras en la historia de la relatividad. Sin embargo, aún era demasiado temprano para poder confrontar sus resultados con las observaciones astrofísicas. Como él mismo lo afirma al final de su libro de 1923: "La teoría de Einstein está confirmada por la experiencia; ésta da cuenta de fenómenos que estuvieron inexplicados durante mucho tiempo, y conduce a nuevas y fascinantes predicciones. El método más correcto y profundo para explorar la geometría del universo y la estructura del cosmos de acuerdo con la teoría de Einstein consiste en aplicar esta teoría al universo en su totalidad, y a utilizar las observaciones astronómicas. Por el momento, este método no da ningún resultado concluyente, dado que el análisis matemático es todavía débil teniendo en cuenta las dificultades del problema, y los datos astronómicos son demasiado escasos como para realizar un sólido estudio experimental del universo. Pero no se trata sino de obstáculos temporarios; nuestros descendientes descubrirán sin duda la verdadera naturaleza de este cosmos que nos alberga [...]".

Y así será, pues Friedmann muere tan sólo un par de años más tarde, demasiado pronto como para ver la verificación de sus resultados en las observaciones de Hubble.

● Aleksandr Friedmann

■ Georges Lemaître

Vimos como, en el inicio de la década de 1920, Friedmann descubre la posibilidad de un universo dinámico tan sólo teniendo en cuenta la teoría y sin ayuda de las observaciones. Esta predicción, sin embargo, habría quedado como una simple curiosidad matemática de no ser por la contraparte astronómica. Aunque Friedmann fue el primero, no

fue el único en combinar la cosmología y la relatividad general de Einstein. Unos años más tarde y un poco más cerca de los astrónomos pioneros, el "misterio" de la expansión ya no era tal. En 1927, y de manera completamente independiente de los trabajos teóricos de Friedmann, el sacerdote belga Georges Lemaître (1894-1966) había propuesto un modelo teórico que explicaba las observaciones de Hubble y su famosa ley de expansión.

Georges Lemaître nace en Charleroi, Bélgica, el 17 de julio de 1894, hijo de Joseph Lemaître y de Marguerite Lannoy. Joseph era abogado de profesión, y una persona que había estado siempre fascinada por las formas mágicas que pueden nacer del vidrio soplado. Así, un día decide hacer realidad su hobby y convertirse en propietario de una vidriería para experimentar nuevas técnicas. El buen funcionamiento de esta pequeña empresa familiar permite que Georges reciba una buena educación religiosa tradicional con los Jesuitas. De muy joven, sigue estudios en humanidades en el colegio Sacré-Cœur de su ciudad natal en donde será –en sus inicios– un estudiante promedio, para luego manifestar verdaderas aptitudes para las matemáticas y coleccionar premios en aritmética, química, física, y hasta en historia. De algunos profesores, Georges guardará un recuerdo imperecedero, como por ejemplo del padre Franz Charlier, quien impartía las clases de poesía y que siempre se mostró exigente y sin concesiones en cuestiones de estilo. Años más tarde, Lemaître mostrará en sus artículos de divulgación científica "cuán bien aprovechó aquellos reproches sonoros que el maestro de poesía distribuía con generosidad" (cf. André Deprit, biógrafo de Lemaître).

Joseph, luego de años de ensayos, había logrado un nuevo proceso para estirar el vidrio. Hasta que un día, la explosión simultánea de un horno experimental y de la caldera, arrasó con su empresa. Súbitamente empobrecidos, los Lemaître deben emigrar a Bruselas donde Georges, que ya había manifestado su doble intención de dedicarse a las ciencias y al sacerdocio, decide postergar sus ideales y, siguiendo los consejos de sus padres, comienza sus estudios en la Escuela de Ingenieros de la Universidad Católica de Lovaina. A poco de esto se desata la Primera Guerra Mundial. Georges será movilizado y la universidad deberá cerrar sus puertas por cuatro años. Ya en el centro de instrucción, el futuro cosmólogo comete la imprudencia de señalar –delante de todo el curso– que el tratado de balística contenía errores; esto le valdrá un sumario y una mirada poco simpática de sus superiores por un tiempo. Sus posteriores acciones y patriotismo, sin embargo, no dejarán de ser premiados posteriormente, al recibir la Cruz de Guerra con palmas, en febrero de 1921, juntamente con otras distinciones.

Terminada la guerra, Lemaître renuncia a sus estudios de ingeniero y se orienta hacia las ciencias básicas. En el año 1919 Lemaître decide hacer un doctorado en matemáticas. Sobre su elección del tema de tesis doctoral, conocemos una pequeña anécdota que –al igual que hicimos antes con A. Friedmann– vamos a relatar. Como nos lo cuenta Valérie de Rath, en un libro que conmemora el centenario del nacimiento del futuro cosmólogo, el joven Lemaître decide contactar al célebre matemático Charles de la Vallée Poussin

(1866-1962). Este último, por su parte, no tiene inconveniente en dirigir la tesis del joven, pero le aconseja ser sumamente cuidadoso en la elección del tema de trabajo, ya que ello influirá fuertemente la nota final del jurado. Lemaître toma nota de estas recomendaciones y de inmediato comienza su búsqueda de un tema que valga verdaderamente la pena. Tres meses más tarde, y algo alicaído por su falta de imaginación, vuelve a su director y le declara: "Estimado profesor, usted me ha hecho notar que la elección del tema de tesis representa la mitad del mérito de la disertación. Yo no he logrado encontrar un tema, y pierdo así la primera mitad. Pero ¿podría usted, entonces, proponerme un tema para que yo me disponga a ganar la segunda mitad?". Sorprendido por tan audaz muestra de retórica, Charles de la Vallée Poussin cede al requerimiento de su estudiante. En 1920, Georges Lemaître defenderá su tesis de doctorado en ciencias físicas y matemáticas con la más alta distinción y se le ofrecerá un cargo de profesor en la misma Universidad de Lovaina.

Sin embargo, las aspiraciones del joven doctor están aún tan sólo parcialmente cumplidas. Su vocación lo llevará ahora a consagrarse de lleno a sus estudios religiosos. Y así, a fines de 1920, es admitido en la casa Saint Rombaut, anexo de la Arquidiócesis de Malines, institución reservada a las así llamadas "vocaciones tardías", como en efecto parecía –a ojos de las autoridades de dicha institución– ser la suya, a juzgar por su edad y su nivel de formación.

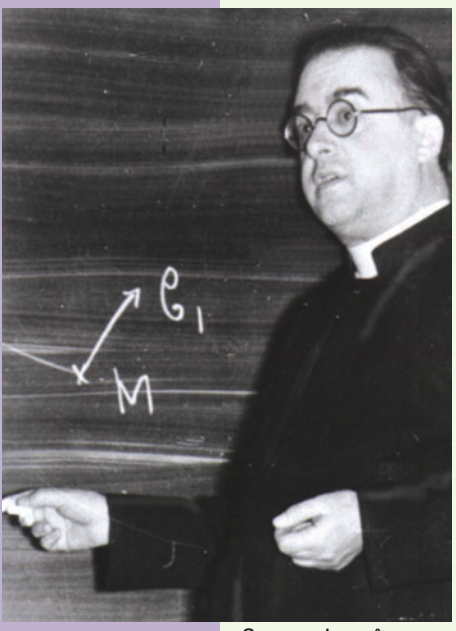
Durante sus estudios eclesiásticos –que termina en forma acelerada en sólo tres años– Lemaître se ve atraído hacia los problemas relacionados con la relatividad y la cosmología científica. El "viejo" seminarista se dedica a estudiar, en forma autodidacta, la teoría de la gravitación de Einstein. Con el fin de presentarse a un concurso de becas al extranjero, Lemaître redacta y presenta una memoria sobre esta novedosa teoría, en una época en la que sólo unos pocos en el mundo la habían estudiado. En julio de 1923, el gobierno belga le confiere el apoyo financiero con el cual viajará a Cambridge, Inglaterra, para pasar el año académico 1923-1924 perfeccionándose con el célebre astrofísico Eddington. Pero antes que esto, el 22 de setiembre del mismo año, Lemaître será ordenado sacerdote, celebrando, al día siguiente, su primera misa en Bruselas y, el 24 de septiembre, otra misa más, esta vez en la iglesia de Saint Christophe, en Charleroi, la misma donde él había sido bautizado unos veintinueve años atrás.

Arthur Stanley Eddington (1882-1944) era uno de los primeros convertidos a la teoría de la relatividad y quien la divulgara más ampliamente en Inglaterra. Era, además, el autor del célebre libro ***La teoría matemática de la relatividad*** que, publicado en 1922, fue la primera exposición (y la más precisa según el propio Einstein) de la nueva teoría en inglés. Fue también él quien dirigió una expedición a la isla Príncipe (en el oeste de Africa) con el fin de medir la deflexión de los rayos del Sol durante el eclipse total en 1919 y comparar con las predicciones de Einstein. Cuando en 1923 Friedmann escribe "La teoría de Einstein está confirmada por la experiencia [...]" es sin duda a estas mediciones de Eddington, y por supuesto también al perihelio de Mercurio, que se está refiriendo.

Lemaître tomará varios cursos en Cambridge, muchos dictados por célebres científicos, como el del físico neozelandés Ernest Rutherford, premio Nobel de química en 1908 e iniciador de la física nuclear, y del mismo Eddington. Además, estudia los trabajos de gravitación de este último y profundiza sus conocimientos en la nueva teoría, para el año siguiente desplazarse al observatorio del Harvard College, en Estados Unidos, y trabajar con Shapley sobre las nebulosas galácticas. Luego se instala en el Massachusetts Institute of Technology, lo que le permite tener contacto directo con las investigaciones de Edwin Hubble y de Vesto Slipher. Lemaître llega en el momento propicio en que, como ya lo mencionamos, Hubble estaba abocado a medir las distancias a las nebulosas, mientras que Slipher estimaba sus velocidades usando sus corrimientos espectrales.

Lemaître realizará allí un doctorado y seguirá muy de cerca los estudios observacionales de estos pioneros. De vuelta en Bélgica, y luego de dos años adicionales de trabajo, demostrará, en 1927, que las soluciones de la relatividad general para la historia, estructura geométrica y evolución del universo predicen tanto universos en expansión como en contracción. Competería entonces a las observaciones astronómicas el decidir entre estas dos alternativas. Así, sus años pasados cerca de los grandes astrónomos no habían sido vanos, pues Lemaître comprende rápidamente que la aplicación de la relatividad general al universo en su totalidad implicaba que éste debía hallarse en expansión. Como en el caso de Friedmann, las ideas del belga fueron pioneras. Pero mientras que el matemático ruso estaba alejado de las observaciones astronómicas y murió demasiado pronto para ver los resultados de Slipher y Hubble, Lemaître en cambio los tuvo muy en cuenta para emitir sus conclusiones.

Sin embargo, lo que le faltó a sus ideas fue publicidad. En efecto, su modelo había aparecido publicado en la revista científica belga Annales de la Société Scientifique de Bruxelles que no era lectura obligada de la época. El mismo año 1927, Lemaître envía copia de su trabajo a Eddington, su profesor en Cambridge. Este le da poca o nula atención, y como resultado el trabajo queda bajo una pila de papeles. Luego del anuncio de Hubble y hacia el año 1930, Lemaître, leyendo los anales de un congreso llevado a cabo en la Sociedad Astronómica Real de Londres, descubre una discusión entre el mismo Eddington y el holandés Willem de Sitter sobre cómo interpretar los nuevos datos de galaxias. Comprende que ese problema es el mismo que él había ya resuelto y vuelve a escribir a su profesor. Ante la evidencia, este último reacciona y hace circular las nuevas ideas con su "apoyo y bendición". Personalidad científica influyente como pocas, logrará hacer que Lemaître y su modelo tengan finalmente la amplia aceptación que se merecían. La importancia principal del trabajo de Lemaître radica en haber sido el primero en comprender que la recesión de las nebulosas extragalácticas (llamadas más tarde galaxias) era la consecuencia directa de la expansión del universo dentro del marco de la relatividad general.



● Georges Lemaître

■ El Big Bang

Lentamente, durante la década de los años 1930, la comunidad científica comprende que el universo, cuando se lo mira a las escalas más grandes posibles –cúmulos galácticos y mayores– posee un movimiento regular y difícil de asignar a causas locales. Así, la expansión debe ser una propiedad universal, una propiedad del mismo universo. Y esto se comprende muy fácilmente de la relatividad general, ya que esta teoría enuncia esencialmente dos cosas novedosas. La primera ya está presente en la relatividad especial (o restringida) de 1905, y dice que el espacio y el tiempo deben mezclarse en una entidad más global que llamamos el espacio-tiempo. La segunda novedad es que este espacio-tiempo puede poseer una geometría "complicada": una geometría dinámica y que, por ende, puede ser deformada, que puede tener una curvatura y poseer una topología no trivial.

A partir de allí, una modificación del espacio ordinario tridimensional en el tiempo se convierte en una modificación de la geometría de un espacio matemático de cuatro dimensiones (el espacio-tiempo).

El tiempo adquiere una cierta igualdad cualitativa con el largo, el ancho o el alto. Como corolario de esto, se deduce que, aún quedándonos en el mismo lugar físico, nuestra posición espacio-temporal cambia y describiremos una hiper-curva (nuestra línea de universo) en este hiper-espacio cuadridimensional.

En este marco, la expansión del espacio (y del universo) en el tiempo no es más que el efecto de la variación de la geometría del espacio-tiempo. ¿Qué es entonces lo que hace que las galaxias se alejen unas de otras? Hoy sabemos que no es debido a una "explosión" que las lanzó una para cada lado. La recesión de las galaxias se debe a que éstas son arrastradas por el mismo espacio dinámico que las contiene, al igual que una hormiga quieta sobre una banda elástica se vería arrastrada por ésta cuando nosotros la estiramos.

No una explosión. Big Bang no es sinónimo de explosión. El Big Bang no trata sobre la creación del universo. Esto puede sorprender, quizás, y por ello merece unas líneas de aclaración.

El origen del universo es uno de los temas que más concepciones equivocadas ha forjado en el imaginario popular. Expresiones tales como "la existencia de una gran explosión" (literalmente, Big Bang en inglés) llevan a pensar, erróneamente, que la expansión del universo comenzó en un punto particular del espacio, una suerte de átomo primitivo (como el que propuso Lemaître en trabajos posteriores) o de huevo primitivo de la cosmogonía hindú antigua, en donde todo el universo se habría hallado concentrado inicialmente. Estas imprecisiones, lamentablemente, son muy comunes en nuestros días, y podrían llevarnos a preguntar: ¿"Dónde" se ubicó dicho átomo inicial?; ¿"Qué lugar" de todo el vasto cosmos fue el privilegiado?

Para los antiguos hindúes la pregunta no presentaría problemas dada la posición de

centralidad de la Tierra. Sin embargo, en nuestros días, la ciencia moderna acepta el principio cosmológico o copernicano, según el cual no existe un lugar privilegiado en el universo; la "gran explosión" no pudo haber ocurrido en un punto particular del cosmos y no en los infinitos otros puntos equivalentes. Y lo que es más provocador aún, ¿Cómo afirmar que la "explosión" se produjo en un lugar dado y a un tiempo dado, si es precisamente en la "explosión" que se crean el espacio y el tiempo?

Lo cierto es que ¡Los modelos del Big Bang no explican el Big Bang! ¿Confuso? Entonces, digámoslo de otra manera: los modelos llamados de la gran explosión no pretenden explicar lo que sucede en esta "gran explosión", ni mucho menos cómo sucede esta "gran explosión". Los modelos del Big Bang sí explican la existencia de un universo en expansión que en el pasado era más denso, energético y caliente. Además, la expansión global del universo se verifica para todo observador en todo punto del universo. Esto lleva a toda una serie de predicciones teóricas que han sido verificadas por muy diversas observaciones astrofísicas, y que sustentan nuestra confianza en estos modelos. En otros términos, los modelos del Big Bang explican con muy alta precisión la evolución de nuestro universo desde épocas primordiales, no su origen. Cerca de este "origen" la descripción del universo a través de la relatividad general, sustento principal de la cosmología teórica, se quiebra. La teoría se vuelve no predictiva, y se debe buscar otra descripción más adecuada. Esta búsqueda forma parte de la agenda de los cosmólogos más osados de la actualidad.

Actividad 4: Unificación de la física terrestre y de la celeste

La teoría de la gravitación universal de Newton fue un hito en la historia de la ciencia. Sirvió para unificar, bajo un mismo marco teórico, la realidad física de los objetos terrestres y de los del cielo. Bajo la fuerte influencia de los escritos de Aristóteles, durante mucho tiempo se pensó que el movimiento de los astros: circular, uniforme y perfecto, era de naturaleza intrínsecamente diferente del comportamiento de objetos sometidos a la gravitación terrestre. Estos últimos, dejados en caída libre, seguían una trayectoria que los llevaba hacia el centro de la Tierra.

Es claro que, en épocas pasadas, el concepto de gravitación que conocemos hoy en día no estaba muy difundido. Muchos eruditos medievales europeos pensaban, incluso, que era imposible que existiesen habitantes en las antípodas de Europa. Se cuenta también que, aun en la época de Cristóbal Colón, esa idea siguió acechando los sueños de más de un teólogo ortodoxo, a pesar de que nadie medianamente instruido creyese todavía en una tierra chata. En efecto, es poco probable que los miembros de la junta salmantina que discutieron con Colón fueran ignorantes en este respecto, pero es muy probable que algún teólogo invocara la posibilidad de "resbalamiento" una vez que los navíos se alejaban más allá de una cierta distancia de Europa. Como nos lo cuenta Ernesto Sábato en

su libro "*Uno y el Universo*": "está era una opinión corriente, pues, como no se tenía idea de la gravitación hacia el centro, se pensaba que era imposible habitar en regiones un poco alejadas del centro europeo: San Isidoro no admitía siquiera la existencia de habitantes en Libia, por la excesiva inclinación del suelo [...] por la misma razón que se negaba la existencia de los antípodas, esos absurdos habitantes con la cabeza para abajo".

Aunque en la época de Newton ya nadie dudaba de la esfericidad de la Tierra, la física de los cielos (que regía el movimiento de la Luna y de los demás cuerpos astronómicos: el ámbito "supralunar") aún era considerada diferente de la física de los objetos "terrestres" (la física "sublunar"). Newton unificó ambos "movimientos".

Imaginemos que estamos en la cima de una montaña muy alta. Desde allí arrojamos una piedra en alguna dirección. Es claro que la piedra caerá a algunos metros de nuestra ubicación. Repitamos el experimento pero arrojando la piedra cada vez más rápido. Cada vez, la distancia recorrida por la piedra antes de tocar la ladera de la montaña será mayor. Con muchísima fuerza (y con un cañón quizás) podríamos incluso hacer que la piedra (o la munición) llegara hasta la base de la montaña. Mayor velocidad, siempre arrojando la piedra desde la cima de la montaña, hará que la piedra alcance varios kilómetros de distancia. En otros intentos, podremos hacer que la piedra, antes de tocar el suelo, se haya alejado de la base de la montaña en varios cientos de kilómetros.

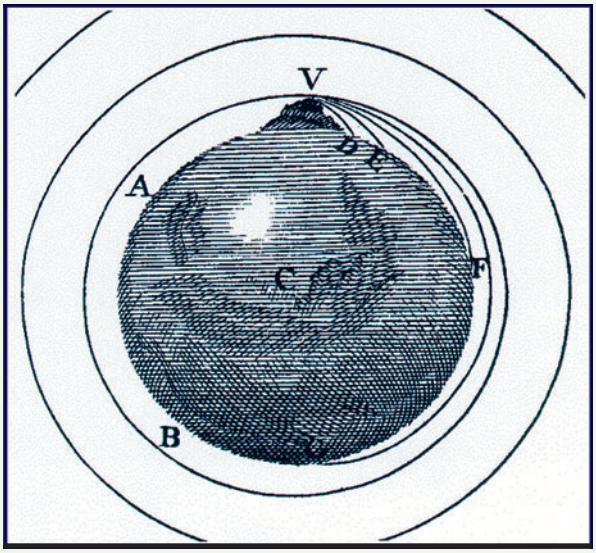
¿Qué sucederá con la piedra si seguimos aumentando la velocidad con la cual la disparamos? ¿Cómo pensamos que se colocan en órbita los satélites artificiales en nuestros días? ¿Hay alguna relación entre estas dos cuestiones?[1]

Continuemos con el relato. Llegado un cierto momento (una cierta velocidad de la piedra), la piedra voladora estará siempre cayendo hacia el piso pero notaremos que el piso "se le aleja" (pues comienza a ser notoria la curvatura de la Tierra). Entonces, imprimiendo mayor velocidad a la piedra haremos que ésta llegue a cubrir un cuarto de revolución alrededor de la Tierra, luego que llegue a las antípodas, luego que cubra mayores distancias, hasta que logre dar toda la vuelta de circunvalación de la Tierra y tocar el suelo en la base de la montaña (al pie de la ladera opuesta a aquella desde donde salió disparada). Llegados a este punto, si ahora disparamos la piedra con velocidad cada vez mayor, haremos que termine su viaje en lugares cada vez más altos de la ladera de la montaña, hasta llegar a una velocidad con la cual la piedra logrará dar toda la vuelta a la Tierra, y lo hará con la altura suficiente como para llegar hasta la cima de la montaña de la cual partió (y, si no nos agachamos, nos golpeará por atrás).

Para evitar accidentes, agachémonos. ¿Qué logramos? La piedra que hemos arrojado se ha convertido en un satélite (artificial) de la Tierra y, si no fuera por su rozamiento contra el aire –que le hace perder velocidad– quedaría moviéndose alrededor de la Tierra por siempre. Pero, detalles más, detalles menos, así es justamente como se comporta la

[1] En el caso en que sea posible, se recomienda que antes de continuar la lectura, trate de discutir con pares esta situación problemática, con el fin de intercambiar opiniones y, eventualmente, llegar a un consenso.

Luna (nuestro único satélite natural). Las leyes del movimiento de los objetos sometidos a la gravitación –Newton lo demostró– son las mismas para todos los objetos. Esta fue la primera gran unificación de la física.



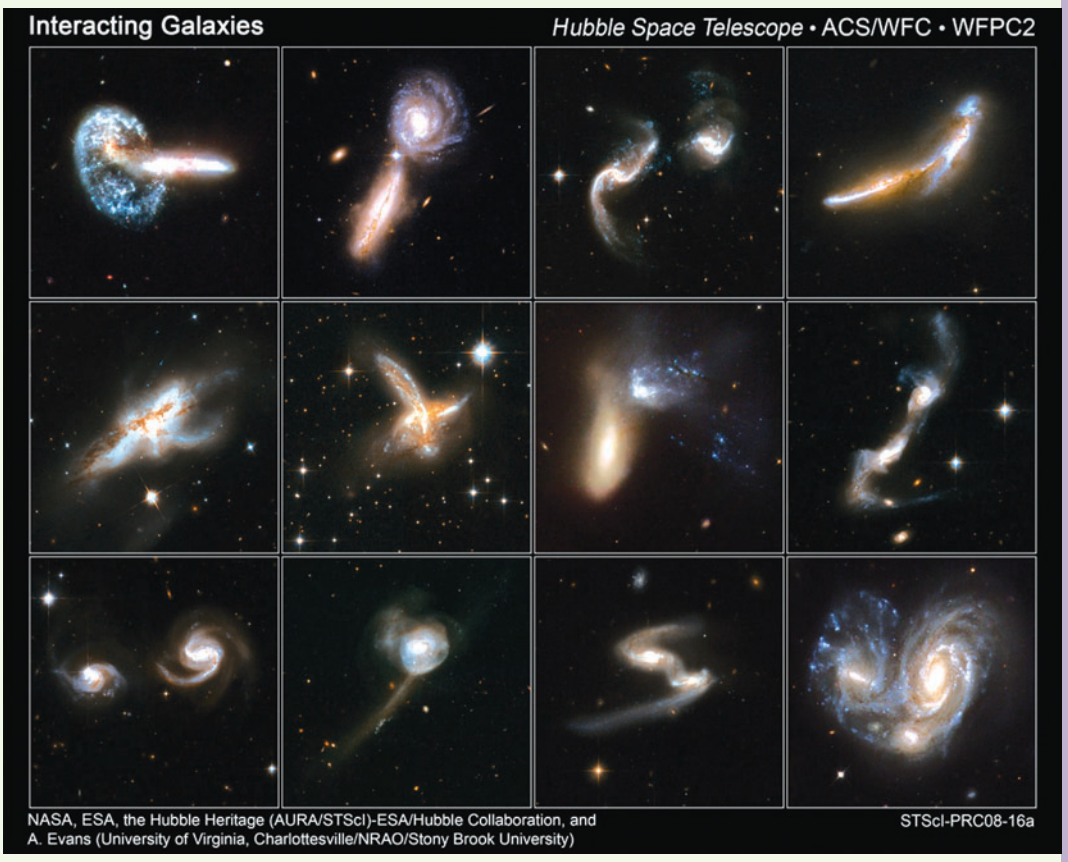
● En el caso de una piedra [...] cuanto mayor sea la velocidad con la que se la proyecta, mayor será la distancia que cubra antes de caer a la Tierra [...] hasta que, finalmente, excediendo los límites de la Tierra, pasará a desplazarse por el espacio." Cita y dibujo pertenecientes a Isaac Newton: "*El Sistema del Mundo*" (publicado póstumamente en 1728).

● Actividad 5: Si las galaxias se alejan con la expansión del universo, ¿cómo es que algunas colisionan entre sí?

El comportamiento del universo está gobernado por diversas fuerzas en continua competencia. Cada una de estas fuerzas tiene una cierta escala de influencia, en la cual domina sobre las demás. En la escala de distancias de la Tierra, la presencia del Sol no nos afecta directamente a nosotros tanto como lo hace la Tierra, pues no caemos hacia el Sol sino hacia el piso. Pero sabemos que la masa del Sol es mucho mayor que la de la Tierra, y por ello su atracción gravitacional sobre todas las cosas debería predominar sobre la atracción gravitacional terrestre. ¿Cómo se entiende entonces que al saltar no caigamos sobre el Sol?

La clave aquí está en darse cuenta de que el Sol se halla muchísimo más lejos de nuestra casa de lo que se halla la Tierra (o incluso el centro de la Tierra). Ahora bien, si consideramos escalas de distancias mayores, como las distancias características de nuestro sistema solar (varias centenas y hasta miles de millones de kilómetros), entonces todo cuerpo (planetas, asteroides, cometas, etc.) cae hacia el Sol, debido a su fuerte gravitación. Pero la zona de influencia del Sol también tiene su límite. Cuando las distancias características exceden las decenas de años-luz, ya el Sol y sus estrellas vecinas están en igualdad de condiciones, y todos estos soles gravitan entre sí y alrededor de concentraciones de masa más prominentes dentro de los llamados cúmulos estelares.

Nótese que, hasta ahora, nada hemos dicho sobre la expansión del universo. Sucede que las escalas de distancia consideradas por el momento son todavía demasiado chicas. ¿Pero qué pasaría si considerásemos el conjunto de muchísimos cúmulos estelares, además de las inmensas cantidades de material interestelar, que forman nuestra galaxia? En este caso, estaríamos estudiando un sistema cuya distancia característica ronda los cien mil años-luz (aproximadamente el tamaño de la Vía Láctea). En esta escala, la interacción que predomina entre cúmulos estelares muy distantes ya no es más la mutua interacción gravitacional, sino la interacción con el centro de la galaxia, donde la concentración de estrellas es muchísimo mayor que en la periferia galáctica. Y así todo termina orbitando alrededor del centro de las galaxias.



● Serie de imágenes del telescopio espacial Hubble, donde se muestran "encuentros muy cercanos" entre galaxias.

A su vez, las galaxias se agrupan en grandes cúmulos galácticos y es recién a escalas de distancias mucho mayores que aquellas que separan estos cúmulos galácticos que empieza

a hacerse notorio el efecto de la expansión del universo. Estos grandes cúmulos de galaxias están entre las estructuras astrofísicas más prominentes que conocen los astrónomos, y que logran permanecer unidos por efectos de la gravitación. Si ahora consideramos distancias características mayores a las anteriores, del orden de los 100 millones de años-luz, la imagen del cosmos que obtendremos será muy diferente de lo conocido. Veremos inmensos cúmulos galácticos que, como abejas al romperse el panal, se dispersan cada uno por su lado y viajan por el cosmos "arrastrados" por un espacio en continua expansión.

Las distancias involucradas entre galaxias aisladas y cúmulos galácticos son ahora tan grandes que la interacción gravitacional entre ellos no puede oponerse al arrastre del espacio en expansión, una suerte de corriente (no de agua, sino de espacio) que los aleja cada vez más. Pero en el vecindario galáctico, interior a los cúmulos de galaxias, la historia es muy diferente. Allí la expansión es subdominante y las galaxias interactúan entre sí, "caen" unas sobre otras, se mezclan y se deforman. El resultado son esas hermosas imágenes de galaxias irregulares tan vistosas que nos muestran los grandes telescopios modernos.

Vemos entonces que fuerzas locales pueden dominar sobre otras "fuerzas" más universales (como la expansión del universo); todo depende de las escalas de distancia características que estemos considerando. La Tierra ha venido orbitando alrededor del Sol por miles de millones de años, aproximadamente, sin alteraciones notorias. Pero ello no quita que pueda existir un planeta similar a la Tierra, ubicado en otra galaxia de un cúmulo galáctico muy alejado del nuestro. Un hipotético astrónomo de dicho planeta extrasolar y su par de la Tierra, verán que la vida transcurre plácidamente, año tras año, órbita tras órbita de cada planeta alrededor de su estrella madre. Sin embargo, si además de mirar las estrellas les interesa la cosmología, sabrán, quizás, que la distancia entre ellos se agranda cada vez más, debido a la expansión del universo.

Capítulo

4

Pilares del Big Bang

"Libro de Dunhuang" (China)

El verdadero interés en los modelos físicos de la cosmología surgió en 1940. Por ese entonces comienzan los primeros desarrollos en la física nuclear. Los físicos comprenden que para formar los núcleos de los elementos químicos de la tabla periódica hacen falta reacciones nucleares, y para ello se precisan altísimas energías y temperaturas. Ciertas ideas de la cosmología, como el mencionado modelo del átomo primitivo de Lemaître, y, como consecuencia, también los modelos del Big Bang que se desarrollarán a partir de éste, brindan la situación física ideal. Estos modelos permitirán a los primeros cosmólogos comprender cómo se llevará a cabo la "síntesis" de los núcleos de los elementos más complejos que el hidrógeno. Proceso que en cosmología denominamos nucleosíntesis.

■ La síntesis de los núcleos atómicos

De acuerdo al modelo de Lemaître, en el pasado, el universo se habría hallado en un estado mucho más denso y caliente que ahora. Estas condiciones habrían favorecido las reacciones nucleares en las que se basa la nucleosíntesis. En dichas condiciones físicas, cabe hacerse la pregunta de si es posible sintetizar todos los núcleos atómicos conocidos hoy. Esto último implicaría que el proceso de síntesis es capaz de unir nucleones sueltos (protones y neutrones, los constituyentes de los núcleos) en forma creciente, hasta alcanzar núcleos arbitrariamente grandes. Las condiciones extremas de energía y densidad del universo temprano, ¿eran suficientes para lograrlo?

La respuesta es negativa, ya que, como sabemos hoy, no todos los núcleos se fabrican durante los primeros instantes del Big Bang (los núcleos pesados se fabricarán más tarde en las estrellas como el Sol, y los muy pesados requerirán de condiciones más extremas a las de los interiores estelares, sólo accesibles en eventos explosivos como las supernovas). Sin embargo, hizo falta que pasara mucho tiempo para que estas ideas dieran frutos y los físicos nucleares y cosmólogos hicieran las cuentas para cerciorarse.

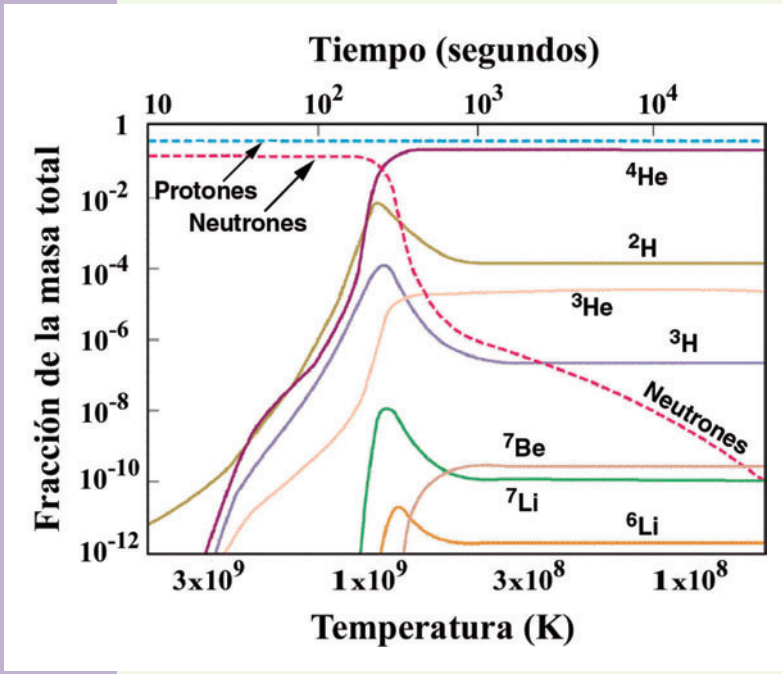
Uno de los problemas principales que inhiben la formación de núcleos grandes en los primeros instantes de la evolución cosmológica es la rápida expansión, y por consiguiente rápido enfriamiento, del universo cuando éste contaba con unos pocos minutos de vida. En esos instantes, el universo se comportaba como un verdadero "reactor nuclear cósmico". Esto es, un reactor de fusión que a partir de los abundantes núcleos simples,

como el del hidrógeno (un protón) y demás neutrones, formaría los núcleos más pesados con varios protones y neutrones. Pero era un reactor que "funcionaba" lejos de su régimen óptimo, pues la rápida expansión universal sólo permitió la formación de un pequeño puñado de núcleos livianos. Para los más pesados, la temperatura se haría rápidamente demasiado baja como para que las reacciones nucleares relevantes pudieran tener lugar.

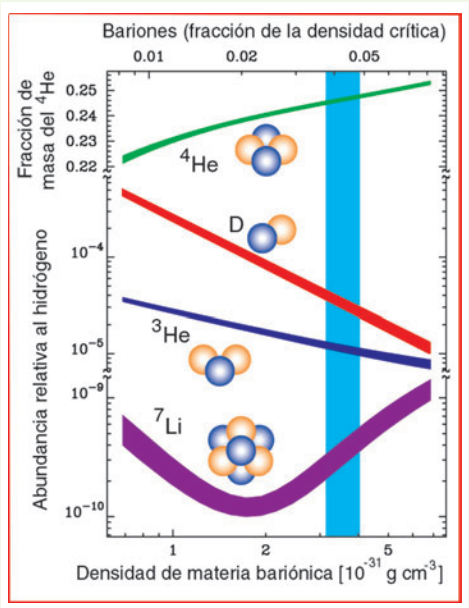
La nucleosíntesis primordial en los primeros instantes de la vida del universo logra fabricar los núcleos de los elementos más livianos, como el del deuterio (un protón y un neutrón), dos variedades del helio (dos protones con uno o dos neutrones), dos variedades del litio (tres protones con tres o cuatro neutrones), entre otras. Sus abundancias, inferidas de las cuidadosas observaciones astronómicas actuales, coinciden asombrosamente bien con las predicciones de los modelos de universo con un comienzo denso y caliente.

Este acuerdo entre la teoría y las difíciles observaciones astrofísicas nos lleva a pensar que los modelos del Big Bang son una excelente aproximación al estado y evolución real de nuestro universo, al menos para las épocas cosmológicas que van desde unos pocos segundos de vida hasta hoy, unos 14 mil millones de años después. Para tiempos anteriores al primer segundo de vida, podemos confiar en la física de las altas energías que ya ha dado sus frutos (y varios premios Nobel) en la predicción de la unificación de las fuerzas fundamentales, como la fuerza electromagnética y la fuerza nuclear débil (por ejemplo, la responsable del decaimiento radioactivo).

Desde hace ya varios años se vienen empleando grandes aceleradores de partículas para producir nuevas formas de materia que sólo pudieron existir en tiempos remotos y en condiciones extremadamente energéticas, inimaginables en nuestros días. Con estos estudios de altas energías, llegamos a describir la física dominante hasta en tiempos del orden de la millonésima de millonésima de segundo (10^{-12} segundo), cuando el universo observable tenía una temperatura de aproximadamente 10^{15} grados y contaba tan sólo con una parte en 10^{15} de su tamaño actual (más adelante, hablaremos del último gran acelerador que comenzó a funcionar en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares, más conocida por sus iniciales CERN, o sea, Conseil Européen pour la Recherche Nucleaire)



● La evolución de las abundancias nucleares durante la expansión y el paulatino enfriamiento del universo están representados por las diferentes curvas de esta figura.
El universo primitivo era extremadamente denso y caliente. En sus primeros 10 minutos de vida se comportaba como un reactor nuclear de fusión, aunque su extrema velocidad de expansión no daba las condiciones físicas como para que pudieran formarse todos los elementos de la tabla periódica de Mendeleev. Esta figura fue adaptada de un trabajo de Robert Wagoner aparecido en el Astrophysical Journal en 1973, y muestra cómo, a partir de esencialmente sólo protones y neutrones, una compleja cadena de reacciones nucleares lleva, literalmente en pocos minutos, a la formación de los núcleos más livianos. Estos son los núcleos de los isótopos del hidrógeno (el deuterio, ^{2}H, y el tritio, ^{3}H), los isótopos del helio (He-3 y He-4) y del litio (Li-6 y Li-7), y el núcleo de berilio, Be-7 .



● Estas curvas muestran las abundancias de algunos de los elementos ligeros formados en los primeros minutos de vida de nuestro universo. Las abundancias se calculan teóricamente en el marco de los modelos del Big Bang, y se expresan en función de la densidad de materia bariónica (protones y neutrones) presente en el universo (el grosor de cada curva da una idea de las incertezas teóricas). La banda vertical corresponde a las observaciones astrofísicas actuales de la abundancia de deuterio primordial, ratificadas por observaciones en la radiación cósmica de fondo. Estas observaciones indican que solo una pequeña proporción de la densidad crítica (menos del 5%) está representada por partículas ordinarias. Los resultados teóricos y observacionales para los cuatro núcleos que se muestran, pese a que sus abundancias varían en casi diez órdenes de magnitud, presentan un muy buen acuerdo. La coincidencia cuantitativa entre la teoría y la observación es asombrosa y constituye uno de los éxitos más importantes de los modelos del Big Bang.

■ Materia no ordinaria

Hay un punto importante a resaltar en lo discutido en la sección precedente sobre los resultados de la nucleosíntesis primordial (así se la denomina para distinguirla de aquella que se produce en las estrellas y que es responsable de los núcleos más pesados). Este punto es el "límite superior" que la teoría impone a la abundancia de protones y neutrones (en cosmología, estos nucleones son los principales constituyentes de lo que llamamos la materia bariónica).

Tengamos en cuenta que en todo cálculo teórico existen ciertas incertidumbres en las variables del problema físico que hacen que los resultados vengan acompañados de ciertas "barras de error". La nucleosíntesis que estamos discutiendo no es una excepción. Esta nos muestra que, con toda probabilidad y con barras de error relativamente pequeñas, la densidad de bariones es de apenas un 5% de la densidad crítica que hoy se piensa que tiene nuestro universo. ¿Qué es esta densidad crítica? Veremos más adelante, que los distintos modelos del Big Bang se distinguen según su contenido energético, esto es, de acuerdo a que su densidad de masa-energía esté por encima, coincida o caiga por debajo de un valor dado, que hoy vale aproximadamente la masa de un átomo de hidrógeno por metro cúbico: esta es la llamada densidad de energía crítica, y su valor surge de los modelos cosmológicos del Big Bang.

Notemos que en cosmología conviene trabajar con "densidades". Esto es, al considerar un tipo cualquiera de constituyente del universo (como electrones, radiación, etc), generalmente calculamos su "masa-energía por unidad de volumen". Esto es sencillo de entender: si el universo resultase ser infinito en extensión, por supuesto que no tendría sentido hablar de su masa, pues ésta sería también infinita; por el contrario, sea el universo finito o infinito, su densidad siempre estará bien definida.

Este valor del 5%, como ya lo mencionamos, es el más probable. Pero la densidad de bariones podría ser incluso un poco mayor. La nucleosíntesis primordial, sin embargo, y siendo conservadores, coloca el límite máximo en un 10% de la densidad crítica actual. Es decir, existe una cantidad máxima de protones y neutrones, y de toda partícula compuesta por éstos, en nuestro universo, y esta cantidad máxima no excede el 10% de la total. Esta cota superior del 10% a la presencia de materia "ordinaria" es nuevamente sorprendente, y quizás hasta una desilusión para muchos. Desde la época de Copérnico sabemos que ni la especie humana ni su planeta, la Tierra, se ubican en el centro del universo; ahora, además, los modelos del Big Bang nos enseñan que el "material" del cual estamos formados ya no es más el más abundante del universo...

Comprendiendo que la materia ordinaria de la cual estamos hechos es apenas un bajo porcentaje de la total, deducimos entonces que existe materia no ordinaria (nobariónica) en alguna parte del universo. Y esta nueva forma de materia-energía aún no se ha podido

detectar, pese a los continuos intentos experimentales que se han venido realizando desde hace años. El estudio de la dinámica de las galaxias nos indica, además, que no toda la materia que habita el universo es visible. Muchas formas de materia, como por ejemplo las estrellas "frustradas", que nunca llegaron a "encenderse", o bien astros gigantes, como el planeta Júpiter, pero que habitan en el halo de la galaxia, abundan en el universo y no emiten luz propia que permita a los astrónomos detectarlos. Estos, y varios otros candidatos hipotéticos de un nutrido "menú cosmológico", forman lo que hoy se conoce como la materia oscura.

Esta materia no visible (que no emite radiación) es incluso más abundante que la materia formada por los bariones. Entonces, deducimos que debe existir un tipo "extraño" de materia, que hoy se conoce como materia oscura nobariónica. Y los últimos avances observacionales señalan que la cantidad este tipo de materia podría elevarse hasta el 90% restante de la materia de nuestro universo. La conclusión está a la vista: la mayor parte de la masa-energía que llena el universo no comparte nuestra misma "materia prima", y no podemos verla ya que no emite radiación.

Recapitulando entonces, la única posibilidad hoy en día de explicar las abundancias cosmológicas de los elementos más ligeros de la tabla periódica, se halla dentro del marco de los modelos del Big Bang. Uno de los pioneros en este campo fue el físico norteamericano de origen ucraniano George Antonovich Gamow (1904-1968), quien tomó muy en serio las ideas de un universo temprano, caliente y denso. Comprendió que en esas condiciones físicas extremas toda forma de energía –partículas materiales y radiación– habría debido hallarse en un estado de equilibrio total, en constante interacción y compartiendo una misma temperatura. Y este estado particular en la historia del universo habría debido dejar una "huella" cosmológica, cuya identidad ahora trataremos de develar.

● George Gamow, pionero de la aplicación de la física nuclear al estudio de las fases más tempranas de vida del universo.

■ La radiación cósmica del fondo de microondas

A muy elevadas temperaturas, los protones tratan de capturar electrones libres para formar átomos. Pero no bien lo logran, la vida de este átomo neonato resulta corta. El medio ambiente está aún demasiado "caliente". Las continuas colisiones entre los fotones –o corpúsculos de radiación– y los átomos terminan destruyendo a estos últimos. Pero el universo se expande y enfría, y con ello los fotones ven menguar la energía a su disposición. Llega un momento en el que la radiación ya no logra disolver los átomos más livianos que se forman –principalmente el hidrógeno y el helio– y rápidamente la mayoría de la materia ambiente se combina en átomos neutros que resultan "transparentes" a la radiación. Así se forman los primeros átomos de la materia neutra. Por su parte, el fondo de radiación ya no encuentra obstáculos en su camino, hallándose al fin libre de proseguir su viaje sin casi alterarse.

Este fondo remanente es la gran predicción de George Gamow. Vestigio lejano de las épocas más tempranas del Big Bang, la radiación cósmica del fondo de microondas es un frío baño de radiación ubicado en la región de las ondas radio, que hoy cuenta con unos pocos grados Celsius por encima del cero absoluto. (Recordemos que las escalas de temperatura absoluta y Celsius sólo difieren en el lugar donde se coloca el cero. El cero de la escala absoluta o cero Kelvin "K" corresponde a 273,15 grados por debajo del punto de congelamiento del agua.)

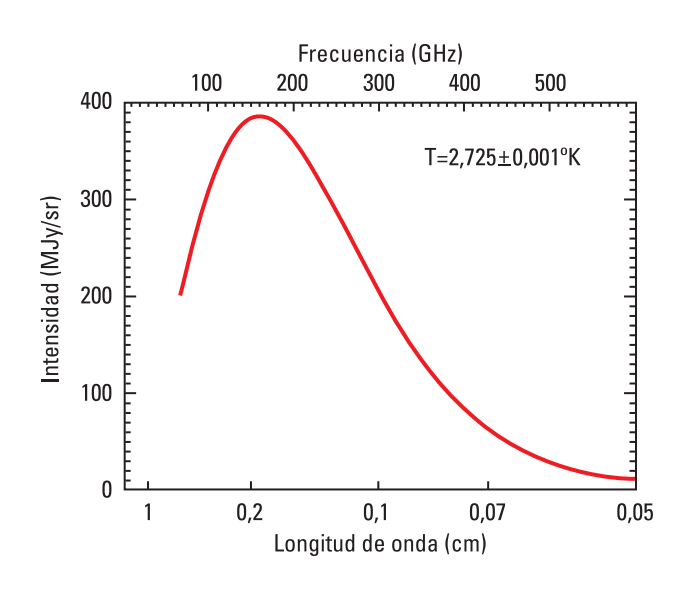
Este fondo de radiación es único en muchos aspectos, pues su espectro (su distribución de intensidades versus la frecuencia) corresponde a lo que en lenguaje más técnico se denomina un cuerpo negro, y sigue con extrema precisión la curva teórica conocida con el nombre de curva de Planck. Tratemos de aclarar aquí lo que entendemos por cuerpo negro que, pese a su nombre, no tiene nada que ver con un determinado color. La radiación de cuerpo negro representa una situación física ideal (y muy difícil de lograr exactamente en la realidad) en la que la radiación se halla confinada en una cavidad cerrada (a la que podemos llamar un horno) a una cierta temperatura. La interacción entre la radiación, las paredes internas del horno, y todo aquello que coloquemos en su interior hará que todos estos componentes se hallen en equilibrio térmico, compartiendo una misma temperatura. Si realizamos una pequeña perforación en la pared del horno y –sin alterar demasiado el sistema– dejamos escapar una cantidad diminuta de radiación, la energía de ésta (o lo que viene a ser equivalente, su frecuencia) dependerá sólo de la temperatura del horno, y no del material de sus paredes o de aquellas cosas que se encuentren en su interior.

La ley de Planck, que mencionamos arriba, nos permite calcular esta temperatura a partir del color de la radiación. Así, si la radiación es predominantemente de color amarillo (el máximo de la distribución del espectro se ubica en la frecuencia correspondiente

al amarillo) podemos estar seguros de que la temperatura del cuerpo negro es de unos 8.000 grados Celsius. Mayores temperaturas harán que la frecuencia de la luz se corra hacia el violeta y más allá, hacia el ultravioleta y los rayos X. Menores temperaturas harán que la frecuencia se corra hacia el rojo, el infrarrojo y hacia las frecuencias radio como las microondas (exactamente como en el caso de la radiación cósmica de fondo).

Ahora bien, el horno que mencionamos arriba, al perder solo una ínfima parte de la radiación que contiene, podemos esperar, sin dudas, que permanezca inalterado por mucho tiempo... igual que las estrellas. Como vimos antes, las estrellas constituyen verdaderos hornos para la formación de los elementos químicos más pesados y viven por miles de millones de años. Asimismo, sabemos que la temperatura de las capas más externas del Sol es de unos 6.000 u 8.000 grados, más o menos, y que la luz solar es aproximadamente amarilla (no exactamente, pero al menos los niños dibujan el Sol amarillo). ¿Podemos deducir que el Sol es –aproximadamente– un cuerpo negro? No nos equivocamos mucho si afirmamos que sí. Esto nos muestra que el nombre "cuerpo negro" no es en absoluto lo que parecía ser.

El espectro térmico de la radiación cósmica del fondo de microondas obedece la ley de Planck con inigualable precisión, y es por ello que nos da una prueba irrefutable de la existencia pasada de un estado de equilibrio térmico total entre todos los constituyentes del "horno cósmico", el universo. Esto es exactamente lo que proponen los modelos con un comienzo "caliente" y energético, como los modelos del Big Bang. Entonces, cuando el universo contaba aproximadamente con unos 400.000 años de vida, este fondo cósmico de radiación se desacopla de la materia ordinaria e inunda todo el cosmos. Será a partir de ese momento, que quedará como el fósil más antiguo, y sin dudas también el más útil (como veremos), del universo primordial.



● Esta imagen muestra la predicción de los modelos del Big Bang para el espectro de energía de la radiación cósmica del fondo de microondas, comparada con el espectro observado. Los errores experimentales son muy pequeños, tanto que caben dentro del grosor de la línea roja. Aún no ha surgido un modelo alternativo a los del Big Bang que pueda dar como predicción una curva con estas características. Este es uno de los tests más importantes de los modelos del Big Bang.

■ El descubrimiento de la radiación cósmica de fondo

Hacia fines de la década de 1940 aparecen los primeros cálculos de Gamow y de sus colaboradores. Como ya lo mencionamos, la física nuclear había progresado mucho en años anteriores. Se trataba de trasladar los conocimientos adquiridos al universo primordial, e intentar hacer fusionar neutrones y protones para formar elementos más pesados. Luego, de estos núcleos básicos se formaría la materia neutra, y con ésta el universo resultaría transparente a los fotones de la radiación, quedando éstos libres en su viaje por el cosmos. El análisis del equipo de Gamow predecía la existencia de esta radiación residual. Sus primeras estimaciones indicaban que la temperatura efectiva debía ser de aproximadamente unos 10 K. Cálculos más refinados, realizados en 1948 por dos de sus colaboradores, Ralph Alpher y Robert Herman, modificarían este valor a unos 5 K.

Gamow y sus colaboradores comprendieron que, de no existir un intenso fondo de radiación que frenase las reacciones nucleares que formaban los núcleos ligeros durante la nucleosíntesis primordial, estas mismas reacciones habrían consumido excesivamente el hidrógeno y el helio para sintetizar núcleos más pesados. Esto, claro está, se contradecía con las observaciones astrofísicas que indican que la densidad de masa ordinaria (bariónica) de nuestro universo observable está constituida en sus tres cuartas partes por hidrógeno (y en algo menos de un cuarto por He-4). Este mismo fondo de radiación (debidamente modificado en su temperatura y frecuencia por la expansión del universo) hoy debería estar presente entre nosotros con una temperatura efectiva de unos pocos kelvins. En efecto, esto se descubrió más tarde.

La teoría nuclear de aquellos años, aplicada al universo en su fase primordial más energética, "predecía" que un fondo residual de radiación debía generarse e inundar todo el espacio. Pero una cosa eran los resultados de los cálculos, y otra muy distinta la opinión personal (llamémoslo "prejuicios") de estos científicos. En particular, Gamow pensaba que la radiación residual, de existir, debía ser más caliente. Alpher y Herman, por su parte, en algún momento dudaron de que este fondo pudiera ser detectado. El astrofísico inglés Fred Hoyle (1915-2001) contó que una vez, durante una conversación que mantuvo con Gamow alrededor de 1956, le presentó sus argumentos que mostraban que los cálculos de Gamow daban un valor incorrecto para la temperatura del fondo residual. Entonces, le señaló que, a su juicio, la hipótesis de un comienzo caliente para el universo (de acuerdo con el modelo del átomo primitivo de Lemaître) debía ser errónea. Esto muestra que ambos estaban al corriente de la posible existencia de un extraño fondo de radiación residual y de las conclusiones de los recientes trabajos teóricos de la física nuclear aplicada a la cosmología. El tema, sin embargo, no fue profundizado por ninguno de estos dos grandes físicos.

Hoyle, quien fuera luego honrado con el título de Sir por sus importantes contribu-

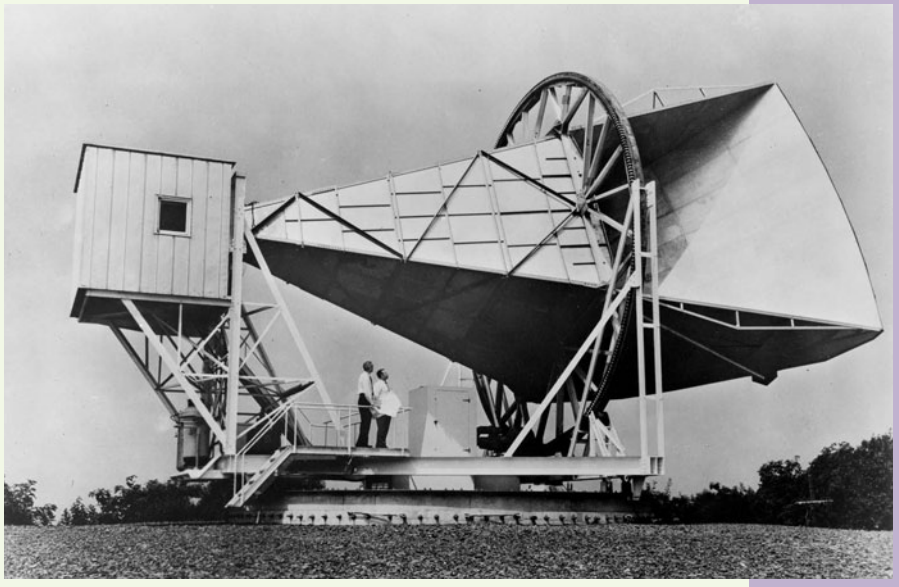
ciones a la ciencia, fue uno de los fundadores del principal modelo competidor del Big Bang, el llamado modelo del estado estacionario. Acérrimo opositor, fue él quien acuñó el nombre Big Bang, mofándose de aquellos que proponían un comienzo "explosivo" para nuestro universo. Irónicamente, sus importantes trabajos posteriores en la teoría de la nucleosíntesis primordial contribuyeron a hacer de ésta uno de los más sólidos y fundamentales pilares de los modelos del Big Bang. Por su parte, Gamow aparentemente era pesimista respecto a la viabilidad de detectar el fondo de radiación residual. Los trabajos de su grupo no serían leídos por la comunidad de cosmólogos hasta después del descubrimiento fortuito de este fondo de radiación.

Para concluir esta sección, contemos brevemente la historia del descubrimiento de la radiación cósmica de fondo. Todo comenzó en el año 1964, cuando los radioastrónomos norteamericanos Arno Penzias y Robert Wilson tenían serios problemas para desembarazarse de un persistente ruido de fondo presente en una antena de los laboratorios Bell, en Holmdel, New Jersey, que había sido planeada para medir ondas radio procedentes de un satélite de comunicaciones. Después de meses de trabajo minucioso, y luego de descartar todas las fuentes de ruido posibles e imaginables, Penzias y Wilson concluyeron que el ruido era debido a la existencia de un fondo de radiación de unos 3,5 K de temperatura. Este fondo de ondas radio era, además, idéntico en todas las direcciones del cielo (era isótropo), no presentaba nivel detectable de polarización y estaba libre de variaciones estacionales; era de "origen desconocido".

Entretanto, el físico norteamericano Robert Dicke (1916-1997), un pionero en la fabricación de radiómetros, había comenzado a interesarse en el fondo de radiación residual. El suponía que este fondo debía producirse por la destrucción de elementos pesados al alcanzarse las inmensas temperaturas de la fase de contracción de un universo "oscilante", modelo que estaba de moda por la época. Así, Dicke sugiere entonces a Peter Roll y a David Wilkinson la construcción de un radiómetro para buscar dicha radiación residual, y asigna al joven James Peebles los cálculos teóricos. Tiempo más tarde, en un coloquio llevado a cabo en Baltimore, Peebles habló sobre el proyecto de su grupo, esta información no tardó en llegar a oídos de Penzias y de Wilson... Mientras que el grupo de Dicke se aprestaba a realizar las primeras mediciones en el techo de su laboratorio, en Princeton, él y sus colaboradores descubren con gran sorpresa que una dupla de radioastrónomos, de los que jamás habían oído hablar, se les había adelantado en el gran descubrimiento.

En los días que siguen, ambos grupos se reúnen en el sitio de la antena de Holmdel para escuchar este "débil susurro" del Big Bang, reconociendo la importancia que significaba para la cosmología. Así es como, aconsejados por el grupo de Princeton, la interpretación de este "ruido molesto" terminó por hacer a Penzias y Wilson acreedores del premio Nobel de Física en 1978 y, a la antena de Holmdel, del título de monumento histórico el 20 de diciembre de 1989. En febrero del año 2003, la experiencia norteamericana MAP, acrónimo de Microwave Anisotropy Probe (o Sonda de Anisotropías de Mi-

croondas) fue rebautizada WMAP en honor a David Wilkinson, miembro de la colaboración fallecido el año previo, y uno de los experimentadores que más impulsaron el campo de la detección de anisotropías en la radiación cósmica de fondo.



● Antena para ondas de radio empleada por Penzias y Wilson donde, sorpresivamente, se descubrió la radiación cósmica del fondo de microondas

■ Esferas de luz: la superficie de la última difusión

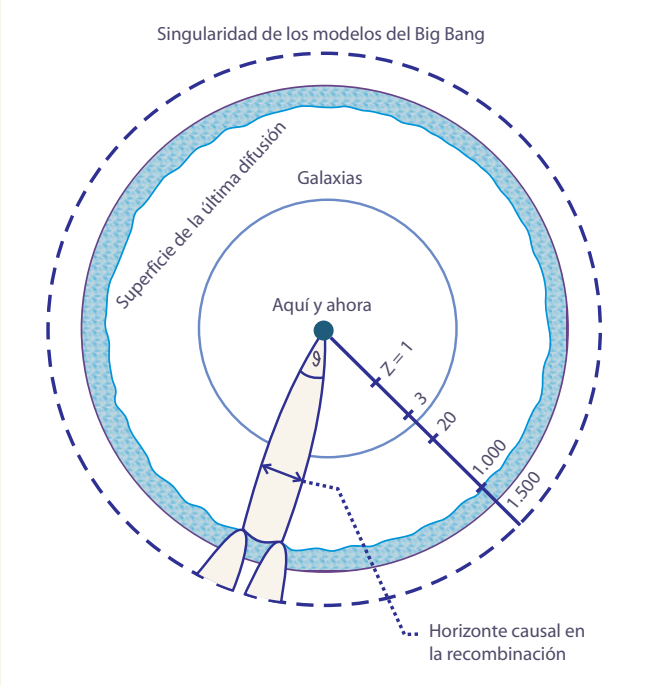
Como ya dijimos, en 1964 se descubrió este fondo cósmico de microondas que constituirá una pieza clave para los modelos del Big Bang. Otros modelos alternativos no podían generar este fondo de radiación, ni explicar todas las propiedades físicas que posee.

Como vimos, la radiación se libera de la materia no relativista cuando la temperatura desciende por debajo de unos pocos miles de grados. En esos instantes, la energía a disposición de los fotones resulta insuficiente como para que estos logren destruir los primeros átomos neutros que se van formando, y es así como la materia y la radiación "se separan" (se desacoplan). A partir de ese momento, todo punto del espacio se ve entonces sumergido en este baño de radiación. En cualquier lugar que consideremos, un hipotético observador recibirá radiación procedente de todas las direcciones posibles, como si se hallara en el centro de una esfera radiante. Pero no sería una única esfera, sino un continuo de esferas dispuestas como las capas de una cebolla. De cada una de estas capas esféricas imaginarias, segundo a segundo, nuestro observador recibiría radiación de lugares cada vez más distantes.

Hagamos una pequeña pausa para aclarar un poco estas afirmaciones. Sabemos que

la radiación se propaga con la velocidad de la luz y que ésta recorre aproximadamente 300.000 km en un segundo. Esta distancia equivale a lo que se denomina un segundo-luz. De la misma manera, en un año de vuelo los fotones de la radiación de fondo recorrerán un año-luz, o sea unos diez millones de millones de kilómetros (10^{13} km). Apenas un segundo después del desacoplamiento de la radiación, nuestro hipotético observador recibirá luz procedente de una esfera imaginaria de radio igual a un segundo-luz. Un año más tarde, recibirá la radiación de la esfera de radio un año-luz, y así siguiendo. Hoy en día, desde nuestra ubicación en la Tierra, veremos entonces un fondo de radiación que proviene del espacio, de una "gigantesca esfera imaginaria" que nos rodea, cuyo radio es de unos 14 mil millones de años-luz, o sea, la distancia recorrida por los fotones durante la casi totalidad de vida del universo.

Resulta ser que esta esfera imaginaria posee prácticamente las mismas características en todas las direcciones hacia donde miremos. Esta isotropía es extraordinaria, y por muchos años no se pudo detectar desviación alguna que excediera una parte en 10.000. Esto nos revela que su origen no puede deberse a algún proceso astrofísico local o particular, ya que de ser así, no veríamos la misma radiación en todo el cielo. La única explicación que hoy nos es posible avanzar en cuanto a su origen es en los tiempos más tempranos de la evolución de nuestro universo, así como lo indican los modelos del Big Bang.



● Se muestra un diagrama espacio-temporal centrado en el observador y con el que tratamos de visualizar las esferas radiantes discutidas en el texto. El observador está ubicado en el centro del esquema, mientras que la "singularidad" del Big Bang se ubica en la esfera más externa, aquí dibujada como una circunferencia. Circunferencias concéntricas cada vez más chicas indican tiempos posteriores. El observador recibe radiación de todas las regiones de la llamada superficie de la última difusión, que no es otra cosa que la esfera radiante imaginaria donde los fotones interactúan por última vez con la materia ordinaria. Hacia la parte inferior del diagrama, se señalan, además, dos de las trayectorias posibles de los fotones, que están separadas por un ángulo.

En un gráfico espacio-temporal como el mostrado, la distancia desde el centro mide el tiempo de vuelo de los fotones emitidos por las galaxias, o aquellos de la radiación de fondo. Este tiempo de viaje es equivalente a su distancia recorrida. Convencionalmente, esta distancia se mide en función del corrimiento al rojo (notado "z") que representa cuánto se alarga la longitud de onda de la radiación debido a la expansión del universo entre el momento de la "emisión" y el de la recepción. Sabemos también que en astronomía, mirar lejos es equivalente a mirar hacia el pasado. Es claro, entonces, que a mayor distancia de alejamiento, estaremos observando objetos astrofísicos cada vez más antiguos, cuya luz fue emitida cuando el universo era mucho más joven que ahora.

A mayor distancia, mayor velocidad de recesión (de acuerdo con la ley de Hubble), lo que implica un mayor corrimiento al rojo del espectro de las galaxias y, en el esquema que nos ocupa, una circunferencia correspondiente más cercana a la "singular" del Big Bang.

La "última difusión" de la radiación sobre la materia no relativista (materia neutra ordinaria) ocurre para un z del orden de 1.100. Los modelos del Big Bang relacionan a z con la expansión del universo: desde la última difusión y hasta el presente el universo agrandó sus dimensiones características en un factor del orden de z, es decir, unas mil cien veces. De la misma manera, la radiación de fondo que fuera "emitida" con una temperatura de varios miles de grados, se enfriará en un factor "mil cien" con la expansión del universo, hasta llegar a tener apenas unos pocos kelvin de temperatura efectiva hoy. Más precisamente, la radiación de fondo que medimos actualmente posee una temperatura efectiva de apenas 2,725 K, o sea menos de 270 grados Celsius bajo cero. Hoy entonces, luego de años de estudio, y de que varias "decenas" de mediciones independientes lo avalen, podemos con todo derecho afirmar que ésta es la temperatura del universo.

También podemos afirmar, sin duda alguna, que es a partir del descubrimiento de la radiación cósmica del fondo de microondas que la cosmología dejó de ser una colección más o menos incoherente de hechos y observaciones, y obtuvo uno de sus más preciados blasones. Un gran número de astrónomos, astrofísicos y físicos nucleares se interesaron en esta nueva ciencia y comenzaron a estudiar sus más íntimos detalles, perfeccionándola sin cesar. Este descubrimiento estimuló el renacimiento de la cosmología física en los años 1960 y la llevó lejos de los vapores de la especulación, hasta convertirse en una rama de las ciencias físicas. La cosmología pasó así a formar parte de las ciencias de precisión, cuyos modelos están sujetos a ser confirmados por la experiencia y la observación, o refutados en caso de ir en contra de estos.

La radiación de fondo fue descubierta por accidente, al igual que lo fue la famosa piedra de Rosetta. Esta última constituyó un elemento clave para develar muchos de los secretos de una de las civilizaciones más enigmáticas de las que tengamos memoria, ya que ayudó a los egiptólogos a descifrar los herméticos jeroglíficos egipcios durante el siglo XIX. De la misma manera, veremos que la radiación de fondo permitirá a los cosmólogos de hoy descifrar la forma, el contenido y, por qué no, también el futuro de nuestro universo.

¿"Radiación de fondo" o radiación cósmica del fondo de microondas?

La "licencia" que a menudo uno se toma al emplear la primera forma en lugar de la segunda (más correcta) puede confundir al lector, sobre todo si se tiene en cuenta que también existen varios otros "fondos cósmicos" de radiación. Ejemplos son el fondo cósmico infrarrojo, el óptico y el de rayos X, cuyos máximos de intensidad respectivos están ubicados en el espectro en orden creciente de frecuencias, luego del máximo de la "radiación de fondo" (este último domina en amplitud sobre los otros). Sin embargo, ninguno de estos tres fondos cósmicos se asemeja al nuestro. Hoy se piensa que el fondo X es en su mayoría debido a la emisión de potentes fuentes astrofísicas individuales no identificadas (no resueltas por las antenas de medición) y por lo tanto su origen no es primordial. Lo mismo sucede con los fondos óptico e infrarrojo, cuyo origen se estima es debido a la suma de las emisiones de diversas fuentes, envueltas en gas y polvo intergaláctico, en el universo reciente (y por lo tanto muy posterior a la "emisión" de la radiación de fondo).

■ La geometría del universo

Los modelos de Friedmann-Lemaître que vimos anteriormente, y que dieron origen a los actuales modelos del Big Bang, son modelos relativistas. La relatividad impone que la física se desarrolle en el seno de una entidad geométrica de cuatro dimensiones, a la que llamamos el espacio-tiempo. Toda la evolución del universo está dada por la evolución de esta geometría. Pero no existe tan solo un modelo del Big Bang, sino toda una familia de modelos. Y estos modelos se distinguen uno de otro por su geometría.

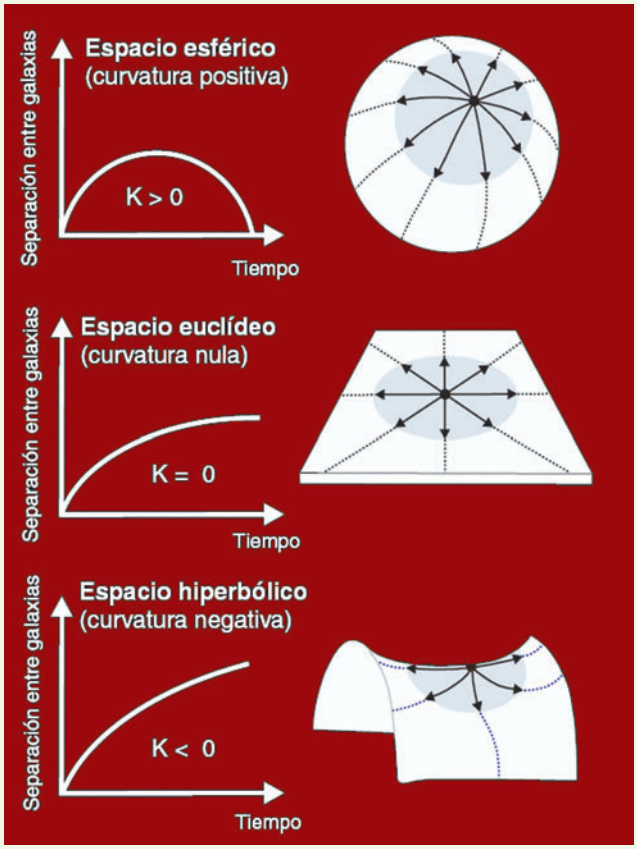
Consideremos primero la geometría espacial. Existen tres tipos posibles: espacios con curvaturas positiva, nula o negativa. El primero corresponde a un pedazo de esfera, pero no es una esfera de las comunes que se describe con tan sólo dos coordenadas angulares, como la latitud y la longitud. La esfera a la que nos referimos es una generalización a tres dimensiones (las dimensiones del espacio físico en el que vivimos). Este espacio es finito (y sin bordes) y lo representamos en la parte superior de la figura que sigue. Notemos que, por razones de visualización, esta representación suprime una dimensión espacial.

Un dato curioso es que, en este tipo de espacio un rayo de luz podría dar la vuelta a todo el universo y volver al punto de partida (incluso varias veces), de la misma manera que el portugués Fernando de Magallanes (y el español Juan Sebastián de Elcano) lo hicieron en su viaje de circunnavegación de la Tierra en 1522. Aunque, si a la expedición Magallanes/Elcano le llevó casi tres años dar la vuelta, al fotón que se pasea por este particular universo, de acuerdo a los cálculos, le llevará la totalidad de la vida del universo. Veremos más adelante que este tipo de geometría esta relacionada con el contenido energético del universo. La cantidad de materia-energía que contiene en este caso es tal, que

el universo termina contrayéndose sobre si mismo: el fotón apenas si logra "dar la vuelta al universo" antes de que este final ocurra.

El segundo caso corresponde a un espacio plano, infinito en extensión, desprovisto de curvatura, como lo imaginara ya Euclides en su tratado de geometría del año 300 a.C.

Finalmente, existen espacios de tres dimensiones (también infinitos) con curvatura negativa. La imagen inferior de la figura nos muestra una representación en forma de "silla de montar", nuevamente con una dimensión espacial suprimida.



● Las tres geometrías espaciales posibles en los modelos de Friedmann-Lemaître del Big Bang. La columna de la izquierda representa la separación de dos puntos del espacio suficientemente alejados (por ejemplo, dos galaxias extremadamente distantes) en función del tiempo para los tres tipos de curvatura espacial "K" (positiva, nula o negativa). La columna de la derecha muestra la geometría espacial local en cada uno de estos casos (geometría esférica, euclídea o hiperbólica) para los correspondientes universos bidimensionales, donde, para simplificar la descripción, hemos suprimido una dimensión espacial.

Notemos ahora mismo algo importante de estas tres representaciones para la curvatura de nuestro espacio tridimensional. En el caso "esférico" las trayectorias de todo par de partículas materiales o corpúsculos de luz, aunque inicialmente tiendan a separarse, terminarán por convergir. Es un caso análogo a lo que sucede con dos aviones que partiendo del polo Norte vuelven a encontrarse en el polo Sur. Si los pilotos desconocieran la esfericidad de la Tierra, podrían pensar que, durante sus viajes, existió una fuerza "desconocida" que los atrajo uno al otro. Hoy, sabemos que sus trayectorias se volvieron a cruzar

debido a que el espacio por donde se movían (la superficie bidimensional de la Tierra) es curvo; en otras palabras, la "curvatura" reemplaza a la "fuerza". En el caso cosmológico, sabemos que las leyes que rigen la física son las leyes de la relatividad general, donde la fuerza gravitatoria de Newton ya no existe (fue "abolida" por Einstein) y es la materia la que curva al espacio.

En el caso esférico en tres dimensiones, las trayectorias se cruzarán debido a la gran densidad de materia-energía presente en el universo que curva el espacio que contiene los objetos, y que hace aproximarse a sus geodésicas, o trayectorias más cortas entre dos puntos. Es por esto que los modelos del Big Bang con este tipo de curvatura (representada por "K", en este caso positiva) corresponden a universos con una alta densidad de energía. Alta densidad... ¿con respecto a qué? Alta, si se la compara con la cantidad que –en secciones anteriores– llamamos la densidad de energía crítica, y que surge de los modelos cosmológicos. La densidad crítica varía con la época cosmológica –disminuye con la expansión del universo– y hoy vale, aproximadamente, la masa de un átomo de hidrógeno por metro cúbico.

Por el contrario, aquellos universos que posean una densidad menor a la crítica, tendrán una curvatura K negativa y las geodésicas tenderán a separarse por siempre; en el ejemplo bidimensional de la figura, dos bolitas que inicialmente comiencen a moverse en dos direcciones cualesquiera, aunque éstas sean paralelas, se alejarán cada vez más para no volver a juntarse nunca. Estos espacios tienen una geometría llamada hiperbólica y, aunque la representemos en la figura como una silla de montar, debe quedar claro que es una silla de montar en todo punto del espacio. Esto es, en cada punto arbitrario de este universo en el que nos ubiquemos, la curvatura "local" que veremos será la dibujada en la figura.

Finalmente, el caso intermedio o crítico corresponde a una geometría plana, Euclídea, como la que generalmente aprendemos en la escuela y donde los ángulos interiores de un triángulo suman siempre 180 grados (en el caso esférico, suman más de 180 grados y en el hiperbólico, menos. Vale la pena verificar esto, dibujando triángulos sobre esas superficies).

■ El parámetro Omega

Mencionamos que la densidad que hoy estimamos que tiene nuestro universo es de aproximadamente un átomo de hidrógeno por cada metro cúbico. Este valor nos puede parecer ínfimo, sobre todo, por ejemplo, comparado con aquellas regiones de densidades inmensas en el núcleo de los astros. Este valor es un promedio sobre todo el universo observable. Y de la misma manera que sabemos que abundan las regiones de densidades extremas, también existen inmensas zonas vacías de toda forma de materia, como en efecto

nos lo indican los actuales censos de galaxias. Esta densidad de energía, que llamamos "crítica", hace las veces de línea divisoria entre universos de muy diferentes características y evoluciones. Es por ello que los cosmólogos han decidido definir un nuevo e importante parámetro cosmológico, al que han bautizado con la última letra del alfabeto griego: Omega, escrita en mayúsculas, y que no es otra cosa que el cociente entre la densidad de materia-energía real del universo y la densidad crítica. Es por ello que un valor de Omega mayor (menor) que 1 indica que la densidad de materia-energía real del universo es mayor (menor) que la crítica y, en consecuencia, que la geometría del espacio físico tridimensional será esférica (hiperbólica) y de curvatura positiva (negativa); el valor crítico Omega = 1 indicará en cambio un universo Euclídeo ("plano" o de curvatura nula) de densidad idénticamente igual a la crítica.

El parámetro Omega fue definido como el cociente de dos cantidades variables en el tiempo y, por lo tanto, también variará con las distintas épocas cosmológicas. Esto es así pues tanto la densidad real del universo como la crítica varían –disminuyen– con la expansión. Sin embargo, los posibles valores de Omega no están completamente libres. Universos que "nacen" con un valor de Omega mayor que 1 (K positiva), permanecerán siempre con Omega mayor que 1. Universos que nacen con Omega menor que 1 (K negativa), permanecerán siempre con Omega menor que 1. Esto es fácil de entender. Porque dado que en los modelos simples que estamos discutiendo la curvatura espacial nos indica la extensión del universo (finito –sin borde– para K mayor que cero; infinito para K menor que cero), sería difícil concebir que la evolución del universo lograra transformar un universo que era inicialmente finito (con K>0 y Omega > 1) en uno infinito (con K<0 y Omega < 1), o viceversa. Así entonces, el valor Omega = 1 indicará una suerte de "línea divisoria de aguas" entre los distintos tipos de universos posibles, dentro del marco de los modelos del Big Bang.

Concluyamos esta sección repitiendo una vez más que todo lo dicho sobre las trayectorias vale para cualquier partícula material o corpúsculo de radiación como los fotones. Esto es así ya que si dejamos de lado los otros tipos de interacciones conocidas (como la electromagnética) y nos concentramos en la gravitación, la fuerza que Newton introdujera en su gran unificación de los *Principia* de 1687, ahora es reemplazada por la curvatura del espacio (y del tiempo). Una vez que el Sol, que contiene el 99% de la masa del sistema solar, modifica (curva) el espacio a su alrededor, todos los planetas tienen, automáticamente, sus posibles rutas ya trazadas. En primera aproximación, la trayectoria seguida por Neptuno y aquella que seguiría un solo electrón en el lugar de Neptuno serían las mismas. Estas consideraciones son clave para comprender los experimentos recientes en la radiación cósmica de fondo, los que han permitido estimar que la geometría de nuestro universo es, en muy buena aproximación, plana (o sea, el parámetro Omega es aproximadamente igual a 1).

Actividad 6: La isotropía del espacio

En la cosmología estándar se supone que el espacio es isótropo. Esto quiere decir que, para un dado observador, el universo presenta iguales características en todas las direcciones hacia donde se mire. El caso de un barco que navega en aguas tranquilas en alta mar es un buen ejemplo. Desde la borda del navío podemos ver que el mar se extiende en forma suave hacia el horizonte, y en todas las direcciones que observamos el mar luce igual, con iguales características, en suma, isótropo. Claro que, si miramos cerca de la quilla del barco, o incluso a decenas de metros de éste, las ondas sobre la superficie no serán todas iguales. Pero el tamaño de estas olas es muy pequeño comparado con la distancia al horizonte y, por ello, si nos concentramos en el océano, las olas irregulares serán apenas detalles del paisaje.

Volviendo al espacio, y de idéntica manera a lo que sucede con el océano, nosotros no observamos la isotropía a nuestro alrededor pues, por ejemplo, este libro está adelante de los ojos del lector, y no a su espalda. El Sol en cada instante ocupa un lugar particular en el cielo de la Tierra. La Vía Láctea no cubre toda la bóveda celeste, la mayor población de sus estrellas luminosas se concentra en un disco plano rotante, en cuya periferia se ubica nuestro sistema solar. Todo esto indica un espacio (un universo cercano) altamente anisótropo, es decir, que no satisface la condición de isotropía.

La isotropía del espacio sólo se verifica a muy grandes distancias cosmológicas, mucho mayores que las que separan entre sí a los cúmulos de galaxias. A estas distancias las observaciones astronómicas muestran aproximadamente las mismas estructuras astrofísicas y las mismas condiciones físicas de ese universo distante.

Pero tengamos en cuenta que todo esto vale para un determinado observador: nosotros en la Tierra. Nada sabemos sobre lo que podría ver en el cielo un hipotético astrónomo que trabajase en algún lugar perdido de una lejana galaxia en los extremos del universo observable. De hecho, la isotropía que nosotros vemos en el cielo distante puede ser debida a que somos afortunados (o especiales). Imaginemos un turista que escaló la única montaña que existe en medio de un desierto. Desde la cima, el afortunado turista verá que todas las direcciones son iguales. Sin embargo, cualquier otro observador que no se ubique exactamente en la cima de la montaña verá un paisaje anisótropo, precisamente porque desde su punto de observación la montaña se hallará en una dirección pero no en las otras. ¿Será así nuestro universo? ¿Estaremos ubicados en una región particular (especial) del cosmos?

¿Cuál de estas tres imágenes que siguen representa (en forma simplificada y en dos dimensiones) a un universo isótropo? ¿Cuál representa un universo anisótropo? Pero aquí tenemos tres imágenes. La que falta, ¿representa un universo isótropo o uno anisótropo? [Por supuesto, cada imagen que mostramos es sólo un recorte de un universo infinito con iguales propiedades a las graficadas; vale decir, olvidémonos de los bordes de las imágenes.]

Imagen 1

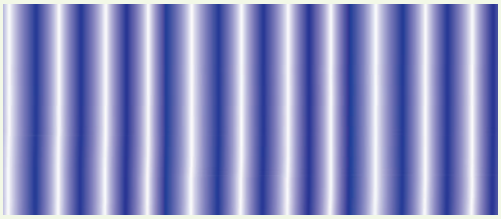


Imagen 2

Imagen 3

Respuesta - Actividad 6:

La primera imagen muestra un universo isótropo, pues en cualquier dirección que se mire (en este universo bidimensional) se observa lo mismo. La segunda imagen muestra un universo anisótropo: en este hay claramente una dirección espacial privilegiada. La tercera imagen, nuevamente, muestra un universo anisótropo. Pero esta vez, hay una diferencia entre esta imagen y las dos anteriores. ¿Cuál es? La respuesta aparece entre las respuestas de la siguiente actividad.

Actividad 7: La homogeneidad del espacio

En la cosmología estándar se supone que el espacio es homogéneo, vale decir que todos los lugares del cosmos son idénticos y comparten iguales condiciones físicas: igual temperatura, igual densidad de materia, etc. Como ya lo discutimos en el caso de la isotropía del espacio, aquí nuevamente, la homogeneidad no es una propiedad obvia para ningún observador. Este libro está aquí y mi vecino no lo tiene; allá hace calor y aquí hace frío. Así, el universo que observamos en la vida cotidiana dista mucho de ser homogéneo.

La homogeneidad que se discute aquí es la que veríamos en escalas de distancias astronómicas inmensas, mayores que los 100 millones de años-luz. Es decir, si dividiéramos el universo observable en regiones de unos 100 millones de años-luz de lado, estos diferentes volúmenes se verían muy similares unos con otros. Si cada uno de estos volúmenes fuese caracterizado por una cantidad de materia promedio y una temperatura promedio, estas cantidades serían muy similares en todos los volúmenes del universo observable. A esto, en cosmología llamamos la homogeneidad.

Veamos algunas consecuencias de la homogeneidad. Imaginemos que somos capaces de viajar hacia cualquier lugar del cosmos, instantáneamente. Si el universo es homogéneo, en todos lados veremos iguales "paisajes": igual cantidad de estrellas, de planetas, de galaxias y de seres vivos que los pueblan. Estos seres y las estrellas que les dan la vida, cambian en el tiempo, nacen y mueren. Al realizar otro viaje, millones de años más tarde, veremos en todos lados lo mismo, pero, a diferencia del viaje anterior, ahora todas las cosas serán un poco más viejas. Viajes posteriores revelarán idénticos resultados: en todos lados iguales paisajes, iguales condiciones físicas, pero objetos y seres vivos cada vez más evolucionados, en un estado de cambio continuo. Si el universo es homogéneo y permanece homogéneo con el correr del tiempo, deducimos que las leyes físicas que gobiernan su evolución deben ser las mismas en todos lados. Quizás no conozcamos todas las leyes –o las verdaderas leyes– que gobiernan la evolución del cosmos, pero si exigimos un universo homogéneo, entonces forzosamente estas leyes deben ser universales, es decir, las mismas para todos, siempre.

¿Será así el cosmos? ¿Imagina alguna forma de verificar la homogeneidad del universo?

Para pensar esta pregunta, quizás sea útil recordar que las sondas Voyager, los instrumentos artificiales más lejanos jamás enviados por el hombre, partieron de la Tierra en 1977 (Carl Sagan estuvo entre los que tramaron esta misión). Viajando a la velocidad de la luz, las señales que envían las Voyager cubren la distancia a la Tierra en algo más de 14 horas. Como comparación, recuérdese que los rayos del Sol tardan unos 8 minutos en llegar a la Tierra. Esto da una idea de lo lejos que están de nosotros y de la inmensa distancia que llevan recorrida las Voyager. Lamentablemente, la estrella más cercana al Sol excede los 4 años-luz de distancia. Por ahora, viajar por el espacio no es como lo muestran los films de ciencia ficción.

Volvamos a mirar las imágenes 1, 2 y 3. ¿Cuál de las tres representa (nuevamente en forma simplificada y en dos dimensiones) a un universo homogéneo? ¿Cuál representa un universo inhomogéneo? [Recordar que cada imagen representa sólo un recorte de un uni-

verso infinito con iguales propiedades a las graficadas; o sea, alejémonos de los bordes.]

• **Respuesta:**

Las dos primeras imágenes muestran un universo homogéneo, aunque una posee una clara dirección espacial privilegiada (la segunda), por ello no representa a un espacio isótropo. En la primera imagen sí verificamos la isotropía espacial. La última imagen representa un universo inhomogéneo.

"Constelaciones zodiacales" (Sello Sumerio)

"Zodiaco de Dendera" (Egipto)

Capítulo 5

Limitaciones de los modelos: la Inflación

Los modelos del Big Bang son notablemente exitosos en muchos aspectos. Ya hemos enfatizado en reiteradas ocasiones, su capacidad de explicar varios hechos observacionales. Entre estos, la naturaleza dinámica de nuestro universo y el origen de la radiación cósmica del fondo de microondas, reliquia fósil de la época del desacoplamiento de la radiación y la materia. Además, estos modelos presentan un mecanismo adecuado para fabricar las abundancias observadas de los núcleos de los elementos más livianos durante la nucleosíntesis primordial. Es así, que los modelos del Big Bang permiten describir la historia del cosmos desde épocas muy remotas, digamos, unas fracciones de segundo luego de la "singularidad inicial", y hasta el presente, cuando nuestro universo cuenta con unos 14 mil millones de años.

A pesar de estos éxitos, existen ciertas limitaciones. Estas, sin embargo, no son inconsistencias del formalismo. Por el contrario, los modelos del Big Bang ofrecen el marco teórico adecuado para que los cosmólogos se planteen ciertos interrogantes que estos modelos, sin embargo, no logran responder.

Ejemplos de estas limitaciones son los llamados “problema de la planitud espacial” y “problema del horizonte”, que esencialmente nos plantean interrogantes del tipo: ¿Por qué nuestro universo contiene una cantidad de materia-energía tan próxima a la crítica? (como lo indican las más recientes observaciones) o, en otras palabras, ¿Por qué es el universo tan próximo a un espacio plano (o euclídeo)?; ¿Por qué es tan grande y viejo?; ¿Por qué nuestro universo, a muy grandes escalas, se nos muestra tan uniforme en todas las direcciones en que lo observamos? (¿Por qué es tan isótropo?).

Pasaremos, ahora, a explicar estos interrogantes, y veremos que hizo falta complementar a los modelos del Big Bang con "algo más". Ese elemento nuevo será la Inflación Cósmica. Dejaremos para más adelante otro de los cabos sueltos, que no es menor: el problema del origen de las fluctuaciones cosmológicas primordiales, a partir de las cuales surgieron las galaxias y demás estructuras astrofísicas que hoy nos rodean. Este último, como veremos, resultará ser un tema fascinante y de gran actualidad que nos llevará a hacer un lazo entre el reino de lo extremadamente pequeño, descrito por la física cuántica, y el mundo que rige las mayores escalas astrofísicas de nuestro universo relativista actual.

■ Un universo plano

Comenzamos con el problema de la planitud espacial. Vimos que la evolución de los distintos modelos del Big Bang está poderosamente subordinada a la cantidad de materia-energía que contiene el universo hoy. Universos con baja densidad de energía (Omega < 1) harían que dos galaxias suficientemente lejanas se separasen cada vez más, para nunca volver a juntarse; por el contrario, universos de alta densidad (Omega > 1) darían la posibilidad de que objetos distantes que ahora se alejan, puedan comenzar a acercarse en un futuro lejano, en una fase de contracción del universo.

Sin embargo, en épocas muy primordiales, el término de curvatura espacial de las ecuaciones de Friedmann-Lemaître (proporcional a "Omega-1", y que rige la evolución del universo) es en buena medida irrelevante, y todos los modelos del Big Bang (con Omega mayor, igual o menor que 1) se comportan de idéntica manera que el universo euclídeo (Omega = 1). Esta característica está presente en la misma figura que presentamos arriba: al "rebobinar la película" hacia atrás en el tiempo, hacia épocas muy tempranas de la vida de nuestro universo, vemos que las dos curvas de la izquierda de la figura con Omega distinto de 1 (con K distinto de 0), sin cortarse, convergen sobre la correspondiente al universo euclídeo (con K=0). Esta "irrelevancia" de la curvatura también se puede deducir directamente de las ecuaciones. Ella se debe a que, en dichas épocas remotas la componente de radiación dominaba sobre toda otra forma de materia-energía, y sobre la curvatura en particular.

He aquí el problema, pues en los modelos teóricos del Big Bang la cantidad Omega es fuertemente inestable. Estos modelos predicen que, de estar en dicha época remota la densidad del universo por encima de la densidad crítica (aún en una cantidad ínfima, correspondiente a Omega > 1), rápidamente esta densidad se volvería mucho mayor que la crítica (esto es, Omega >> 1, a pesar de que ambas densidades decrecen con la expansión), lo que llevaría a un colapso inmediato e irremediable del universo, mucho tiempo antes de alcanzar su edad actual (unos 14 mil millones de años, como ya mencionamos en reiteradas ocasiones). En parte, es por esta última frase que el "problema de la planitud" también es comúnmente llamado el problema de la edad. De haber sido Omega > 1 en épocas remotas, rápidamente el parámetro Omega se habría vuelto Omega >> 1, y el universo habría debido colapsar por "su propio peso" miles de millones de años atrás –de hecho, habría debido hacerlo en un tiempo "característico" del orden del tiempo de Planck, 10^{-43} segundos (el único "tiempo natural" del universo primordial).

Pero aún no colapsó (¡qué duda cabe!). ¿Por qué, entonces, es el universo "tan viejo"? Por el contrario, si la densidad hubiese tenido un valor inferior al crítico (Omega < 1), el universo habría debido expandirse a una velocidad tal que difícilmente los grumos primordiales de materia habrían podido crecer hasta formar estrellas y galaxias. Además, su densidad habría disminuido en forma excesiva (llegando a un valor Omega << 1), lo que

habría dado origen, ya en dichas épocas tan tempranas, a un universo casi vacío de materia, nuevamente contradiciendo las observaciones actuales.

Los últimos datos observacionales indican que el universo hoy, después de miles de millones de años de evolución, posee un valor de Omega muy próximo a la unidad. Podemos entonces preguntarnos: ¿cómo dura el universo tanto tiempo en "esta situación física" tan poco natural? (Esto es, ¿cómo llega a sobrevivir hasta los 14 mil millones de años, unas 10^{60} veces el tiempo característico de colapso dado por el tiempo de Planck?). Una posible "solución" a estos dilemas es invocar el llamado "principio antrópico" (que veremos más adelante) según el cual la curvatura espacial K debe (y debió siempre) ser ínfima (o sea, Omega = 1) pues, de lo contrario, las estrellas y la vida no habrían podido desarrollarse. Vemos que este enunciado no aporta grandes ideas, menos aún un mecanismo físico para resolver los problemas de los modelos cosmológicos. Por eso, no muchos cosmólogos se conforman con las premisas del principio antrópico.

Esa situación física que acabamos de mencionar, y que resulta tan poco natural para el universo, es esencialmente la advertencia que, en 1979, James Peebles y Robert Dicke lanzaron sobre la comunidad de los cosmólogos. Sabiendo que los modelos del Big Bang dan predicciones precisas durante todo el rango de tiempos que va desde la actualidad hasta la época de la nucleosíntesis primordial, cuando el universo contaba con apenas un segundo de vida, ellos estimaron con cuánta precisión se debía ajustar la densidad de materia-energía en dicha época para no contradecir drásticamente las estimaciones actuales. Esto es, sabiendo que un universo con una densidad muy próxima a la crítica (Omega próximo a 1) es inestable y que toda pequeña variación hará que, o bien se vacíe, o bien colapse sobre sí mismo, y sabiendo, además, que en nuestra época cosmológica actual la densidad medida de materia no es muy distinta a la densidad crítica, Peebles y Dicke dedujeron algo asombroso (y problemático): la densidad de materia-energía del universo en la época de la nucleosíntesis primordial no podía diferir de la crítica (equivalentemente, Omega no podía ser distinto de 1) en más que una parte en 10^{14}, claramente un resultado muy poco satisfactorio.

Tengamos en cuenta, sin embargo, que en los modelos del Big Bang, como en muchos otros modelos de la física, existen varios "parámetros libres" (aquí llamados "parámetros cosmológicos") que los modelos no se encargan de fijar. Esta labor corresponde a las observaciones astrofísicas y a los experimentos de laboratorio. Los modelos que aquí mencionamos dan una descripción completa y consistente de la evolución del universo, independientemente de cuál sea el valor elegido por la Naturaleza para la densidad de materia-energía. Si, hoy, las observaciones realizadas requieren una precisión "ridícula" para esta densidad cuando el universo tenía 1 segundo de vida, dicha elección es perfectamente aceptable desde el punto de vista de la teoría. En lo que Peebles y Dicke ponían el énfasis, sin embargo, era en la "probabilidad" de que dicho "ajuste fino" pudiera darse en la realidad. Sin tener la menor idea de algún mecanismo físico que pudiese "sintonizar"

a la densidad con tal precisión, este resultado quedaba grabado como un problema mayor que los modelos cosmológicos permitían plantear, pero sobre cuya solución se mostraban mudos. Así pues, con lo que vimos sobre el problema de la planitud, podemos concluir que, por ahora, los modelos del Big Bang no sufren de fallas visibles. Pero estos modelos distan mucho de estar completos.

■ Un universo homogéneo

Consideremos ahora el siguiente problema, aquel de la excesiva uniformidad a grandes escalas astrofísicas, sin que exista una buena razón para ello. En efecto, ¿Por qué habrían diferentes regiones del universo, que nunca pudieron "ponerse de acuerdo", mostrarse tan similares ante nuestros telescopios? "Ponerse de acuerdo", esa es la clave y, como veremos, es por esa razón que este problema es también frecuentemente llamado: el problema del horizonte.

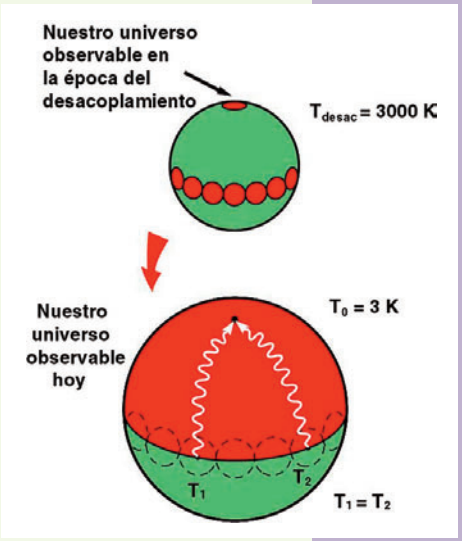
Los horizontes son de gran relevancia en cosmología. Veamos de qué se trata. Para ello, tengamos en cuenta que la combinación de un tiempo de vida finito para nuestro universo (la presunción de que el universo no es eterno) y de la existencia de un límite superior para la velocidad de propagación de cualquier tipo de información (en el caso particular que nos ocupa, de la luz), resultan en una limitación genérica para los modelos cosmológicos simples que aquí tratamos, y que se conoce como la existencia de horizontes cosmológicos. Estos horizontes cristalizan el simple hecho de que, en cosmología, no se puede, en principio, observar más allá de una cierta distancia finita a través del espacio intergaláctico, ya que, si pensamos en los objetos realmente distantes, su luz no ha tenido aún el tiempo de llegar hasta nuestros telescopios. Entonces, resulta que el universo observable siempre será más limitado que el universo real, y que nunca podremos pretender haber observado todo el universo que existe en la realidad.

Apliquemos ahora estos conceptos a la radiación de fondo. Sabemos que este fondo residual de radiación fue liberado cuando el universo tenía apenas unos pocos cientos de miles de años de vida, y que nos llega de todas las direcciones del cielo como procedente de una inmensa esfera radiante imaginaria, que unas páginas atrás hemos llamado la superficie de la última difusión. Mencionamos también el alto grado de isotropía que esta esfera presentaba a los detectores de microondas. Ahora bien, de acuerdo a los modelos del Big Bang, el horizonte cosmológico en la época de la última difusión era muy pequeño (el universo tenía tan sólo unos 400.000 años de "edad"), casi nada en comparación con el horizonte actual, que podemos estimar en aproximadamente unos 14 mil millones de años-luz (la edad del universo expresada en unidades de distancia). Resulta ser que, si proyectamos sobre nuestro cielo actual ese tamaño característico del horizonte cosmológico de la última difusión, el ángulo que subtenderá en el cielo será de aproximadamente

1 grado. Vale decir, sólo un grado en el cielo, o sea unas dos veces el diámetro aparente de la Luna llena en el cielo nocturno (que es de sólo medio grado).

La pregunta que naturalmente surge de estas afirmaciones es: ¿cómo es posible entonces que, a pesar de que nuestro cielo actual se compone de múltiples "parchecitos" de un grado de diámetro –que en teoría deberían ser completamente independientes uno del otro (por motivos de causalidad, ya que la luz no había logrado comunicar una región/parche con las otras, como para que hubiesen podido "ponerse de acuerdo" en sus temperaturas y demás condiciones físicas)– la radiación de fondo que recibimos de cualquier dirección del cielo tenga las mismas características y, como agravante, además con un nivel de precisión asombroso?

Pongamos un ejemplo. Si dos regiones del cielo ubicadas en posiciones diametralmente opuestas distan entre sí en el doble de la distancia de nuestro horizonte. Obviamente, no pudieron jamás estar en contacto causal, y sin embargo se muestran extraordinariamente similares. Si en verdad no hubo contacto (o correlación) entre las distintas regiones distantes que vemos proyectadas sobre el cielo: ¿cómo lograron, entonces, estas regiones acordar sus –en principio– distintas propiedades físicas? ¿cómo es posible que de todas estas regiones recibimos un fondo térmico de microondas "único", con un espectro especial de cuerpo negro (que vimos es el resultado de la fase "caliente" de nuestro universo) y a una misma e idéntica temperatura? Estas son sólo algunas de las muchas maneras equivalentes de formular el llamado problema de la homogeneidad o del horizonte.



● El problema del horizonte, también llamado el problema de la homogeneidad a grandes escalas astrofísicas, presente en los modelos del Big Bang. La existencia de horizontes en cosmología condiciona no sólo la distancia máxima hasta la cual un dado observador puede alcanzar a ver, sino también la distancia límite por debajo de la cual dos regiones cualesquiera de nuestro universo pueden interactuar e influenciarse mutuamente. Dos regiones limitadas del cielo actual separadas por más de 1 grado angular se hallan causalmente desconectadas. En la parte superior de la figura vemos aquella región del espacio que formaba nuestra región causal durante el desacoplamiento de la radiación de fondo y que, luego de transcurridos miles de millones de años y luego de que el universo se expandiese más de mil veces, se convertirá en nuestro universo observable hoy. (Por conveniencia de la visualización, la figura suprime una dimensión espacial.) La radiación de fondo nos llega de distintas regiones causalmente desconectadas del cielo (se muestran dos de estos fotones en la parte inferior de la imagen) y debería por ello mostrarse altamente anisótropa. Las observaciones, sin embargo, muestran todo lo contrario. ¿Por qué el universo es tan homogéneo a las mayores escalas astrofísicas observables hoy? Ese problema es el del horizonte de la cosmología.

■ Buscando soluciones a los problemas del Big Bang

Veremos ahora una forma posible de resolver estos problemas del Big Bang. Los ya enumerados junto a otro problema que veremos más abajo (el de los monopolos) encuentran una posible solución –la que más consenso ha ido ganando en los últimos años- postulando la llamada Inflación Cósmica. La inflación es más una idea que un modelo bien definido del universo primordial (aunque como veremos es una idea muy atractiva). Sin embargo, es una de las pocas proposiciones que no sólo resuelven muchos de los problemas creados por los modelos del Big Bang (sobre todo, de aquellos problemas que surgen de la extrapolación de sus exitosos resultados a épocas muy primordiales, donde la física se vuelve mucho más especulativa), sino que, además, ofrece predicciones teóricas muy detalladas, y que día a día se ven confirmadas por la experiencia. Veremos algunas de estas predicciones más adelante, cuando nos concentremos en la generación de las semillas gravitatorias primordiales que habrían dado origen a las galaxias que nos rodean.

Por el momento, baste decir que los modelos de la inflación (ya que no hay uno único, sino literalmente cientos, lo que muestra que se trata más bien de una idea y no aún de un modelo sólido del universo primordial) postulan que, en algún momento de su infancia (digamos, antes de los 10^{-35} segundos de vida), el universo habría atravesado una corta (pero "explosiva") etapa de expansión acelerada, increíblemente rápida e impulsada por la "fuerza" de un hipotético campo primordial, que en esas épocas remotas habría dominado la energía del universo. Recordemos que, en la cosmología estándar, la expansión cosmológica (dada por el parámetro de Hubble) se va frenando como consecuencia de la mutua atracción de la materia-energía presente en el universo; para lograr un período de expansión "acelerada" se requiere "algo" distinto de la materia conocida; algo que provea una suerte de interacción "repulsiva": el campo mencionado más arriba y bautizado "inflatón", provee dicha fuerza.

La idea principal de la inflación surgió del físico norteamericano Alan H. Guth, en un flash de imaginación que le ocurrió en diciembre de 1979. Siendo un joven post doctorado en el Centro del Acelerador Lineal de Stanford, Guth se había volcado a buscar alguna manera de resolver el problema de la abundancia excesiva de monopolos magnéticos que se producían genéricamente en la física de las altas energías (ver: “Los monopolos magnéticos”). Fue entonces que se topó sorpresivamente con un mecanismo que, no sólo hacía desaparecer los monopolos, sino que también resolvía los problemas de la planitud espacial y de los horizontes, que ya mencionamos, que incomodaban a los cosmólogos desde hacía años.

Los monopolos magnéticos

Son objetos que poseen "un solo" polo magnético, algo que no es simple de encontrar en la naturaleza. Pues cualquier trozo de material magnético que tomemos formará un dipolo magnético, con "dos polos" de distinto signo (norte y sur, por ejemplo). Al cortar este trozo en dos partes, como cualquiera de nosotros puede fácilmente verificar, no obtenemos dos monopolos, sino dos nuevos dipolos magnéticos, con dos polos cada uno. Los monopolos magnéticos de los que hablamos en esta sección, aparte de ser extraños, son estables e inmensamente masivos, dado que se formaron a energías características de la gran unificación, cuando el universo contaba con no más de 10^{-35} de segundo de vida; de allí su fuerte incidencia potencial en la cosmología, y el gran problema que generan.

■ Monopolos

Ya que los monopolos fueron la causa de la inflación, dediquemos unas líneas para tratar de explicar qué son y por qué se los considera "persona non grata" en la cosmología. La motivación inicial de Guth fue la de estudiar el problema de los monopolos magnéticos, objetos singularmente masivos que, de ser producidos muy temprano en la vida del cosmos, terminarían por alterarlo significativamente. ¿Cómo podrían los monopolos alterar la dinámica del universo? Una posibilidad es modificando el contenido energético del cosmos desde épocas próximas a los 10^{-35} segundos, hasta hacerlo colapsar.

El comportamiento de los monopolos magnéticos es, en gran medida, similar al de la materia no relativista pues son muy masivos, con masas del orden de 10^{15} veces la masa del protón, características de la época temprana en que se produjeron, y además interactúan fuertemente con la materia. Ahora bien, sabemos que en aquellas épocas remotas, y en el marco de los modelos del Big Bang, la componente dominante en el universo debió ser la radiación y no la materia de cualquier tipo que se trate. Los resultados tan precisos que mencionamos sobre la abundancia de los núcleos livianos, producto de la nucleosíntesis primordial, así lo requerían. La masiva presencia de monopolos cuando el universo tenía unos pocos segundos de vida cambiaría rápidamente este hecho, alterando significativamente el resultado de la nucleosíntesis primordial, pues pasarían a ser aquellos objetos los dominantes y no la radiación.

Pero los monopolos no sólo arruinarían la síntesis de los núcleos livianos. También, ínfimas fracciones de segundo luego de su eventual formación, los monopolos "abundarían" con una densidad de energía tal, que excedería con creces a la densidad crítica (Omega=1). Esta excesiva densidad habría logrado frenar la expansión cósmica debido a su intensa interacción gravitatoria, resultando, como ya lo adelantamos, en un colapso

prematuro del universo muchísimo tiempo antes de llegar a su edad actual.

Entendemos ahora el motivo por el cual, de existir realmente, los monopolos son un grave problema cosmológico. Pero aún nos falta saber algo más sobre ellos: ¿cómo es que estos hipotéticos objetos habrían aparecido en el universo primordial? Sin entrar demasiado en los detalles, la presencia de horizontes en cosmología, y la consiguiente existencia de regiones tan alejadas que ni siquiera la luz ha tenido el tiempo de conectarlas, permite que ciertas configuraciones de campos primordiales adquieran muy diferentes valores y "orientaciones" cuando el universo contaba con apenas ínfimas fracciones de un segundo de vida. Al expandirse el universo, dichas regiones causalmente desconectadas, y por ello independientes, también se habrían dilatado, llegando a un momento en el que estas configuraciones habrían comenzado a "tocarse", a la manera de pequeñas placas de hielo formadas independiente sobre la superficie de un lago que, al bajar la temperatura ambiente, crecen y se encuentran, produciendo fisuras y "defectos". Precisamente eso son los monopolos, "defectos cósmicos", como los defectos topológicos cósmicos que veremos más adelante en este libro (las cuerdas cósmicas, por ejemplo): son "objetos" ultradensos y energéticos que, de realmente existir en el universo, alterarían drásticamente su historia y evolución (esto sucede con los monopolos pero no con las cuerdas cósmicas, más benignas para la cosmología). Como, en efecto, los monopolos nunca fueron detectados, la idea general era (y es aún hoy) que debería existir algún mecanismo físico idóneo que los hiciera desaparecer.

Guth y muchos otros investigadores estaban abocados a erradicar esta verdadera plaga cosmológica que infectaba los modelos del Big Bang. Como lo señalamos, hacia fines de 1979, Guth da con el mecanismo adecuado, al que bautiza con el nombre "pegadizo" de inflación. Será a partir de allí que la inflación cósmica se encargará de "diluir" la densidad cosmológica de todo objeto indeseable, como los monopolos magnéticos. Y lo hará dilatando en forma tan extrema el volumen de nuestro universo observable, que esos pocos monopolos formados se perderían "fuera del horizonte" y no afectarían ya más a los modelos cosmológicos.

Objetos peculiares y potencialmente peligrosos para la cosmología, como los monopolos y otros defectos topológicos, que en principio podrían inundar nuestro universo a gran escala, son producidos en forma genérica en épocas primordiales gracias a las altas temperaturas e inmensas densidades próximas a la "singularidad" de los modelos del Big Bang. Así, al menos, lo proponen las teorías de gran unificación de las fuerzas fundamentales dentro del marco de los modelos de la cosmología, muchas de las cuales son altamente exitosas y predicen nuevas partículas y fenómenos que ya se han encontrado en los potentes aceleradores actuales. El mecanismo de la inflación no destruye estos objetos indeseables, como los monopolos, sólo los expulsa fuera de nuestro universo observable actual. Pero en las cosmologías simples que estamos describiendo, nuestro horizonte crece con el tiempo (la luz tiene más tiempo para viajar, y cada vez mayores distancias y más

objetos lejanos son en principio observables) y por ello vemos bien que la inflación no constituye una solución eterna. No importa cuán lejos se los haya expulsado, algún día lejano estos monopolos deberían, en principio, reingresar a nuestro universo observable. Quizás para ese momento, cosmólogos y físicos de partículas hayan encontrado una solución aún mejor.

■ La Inflación

Hemos hablado sobre los problemas principales que aquejan a los modelos del Big Bang, y sobre un importante hallazgo: la inflación, que, aunque originalmente inventado para deshacerse de los monopolos magnéticos, nos permitió vislumbrar una adecuada solución a los otros problemas. Discutiremos ahora cómo la inflación resuelve los ya anunciados problemas de la planitud espacial (o de la edad) y de la uniformidad a grandes escalas astrofísicas (o problema del horizonte).

El problema de la planitud, que arriba formulamos en términos de Omega, puede resolverse muy simplemente con un período de expansión acelerada ultrarrápido. Veámoslo con un ejemplo simple: tratemos de hacer equilibrio sobre una pelota de fútbol; evidentemente, lo que no presenta dificultad para una hormiga, no es tarea simple para nosotros. Inflemos entonces esta pelota hasta hacerla unas 12 millones de veces más grande, comparable con el tamaño de la Tierra; ahora nosotros somos como hormigas y la curvatura será apenas perceptible. Inflemos nuevamente esta "pelota-Tierra" otros varios millones de veces y la superficie nos resultará plana con un asombroso grado de precisión. Lo que acabamos de hacer con la pelota (con la imaginación), la inflación lo habría hecho con nuestro universo (en la realidad), pero en una forma millones y millones de veces más pronunciada (un factor del orden de 10^{30} de expansión) y en un tiempo menor que una ínfima fracción de segundo (menos de 10^{-35} segundo).

Finalizada la inflación, el universo retoma su expansión estándar, donde la curvatura comienza a hacerse cada vez más y más perceptible (cuando Omega se aparta de la unidad). Pero dado que la inflación "acható" en forma tan extrema a nuestro universo, la curvatura espacial no nos es perceptible aún hoy, ni lo será por muchos eones a venir. Es esencialmente ésta la manera en que la inflación explica la extraordinaria planitud de nuestro universo actual. Pero nuevamente, como ya pasó con los monopolos, la inflación no provee una solución eterna. Algún día, en el futuro muy, pero muy lejano, deberíamos percibir una ligera discrepancia con el universo plano (si nuestras ideas actuales se mantienen firmes, algo que, con la experiencia de los últimos siglos de ciencia, nadie es capaz de asegurar).

Veamos ahora el tema de la extrema uniformidad a gran escala de nuestro universo actual (el problema del horizonte). La solución inflacionaria también "ata" este cabo

suelto de los modelos del Big Bang. En esos instantes inmediatos luego de la hipotética singularidad inicial, toda la energía-materia que luego formaría nuestro universo observable estaba condensada en un diminuto volumen de apenas 10^{-25} centímetros de radio, más o menos (no más, porque la luz sólo había tenido 10^{-35} de segundo para viajar). Los constituyentes básicos del universo presentes dentro de dicho volumen estaban en contacto causal, y por ello habían tenido el tiempo suficiente para interactuar a través de las leyes usuales de la física, y también de "ponerse de acuerdo" en sus propiedades, como, por ejemplo, compartir una misma temperatura. Pero la vida de este volumencito no habría de permanecer tranquila; cuando se inicia la inflación (aún no sabemos muy bien cómo ni por qué) diversas regiones de nuestro vasto universo, y este pequeño volumen en particular, se ven dilatados (inflados) increíblemente, hasta que nuestro parchecito de sólo 10^{-25} centímetros alcanza varios metros de extensión. Luego, la inflación termina (tampoco sabemos a ciencia cierta cómo ni por qué) y este volumen se expande de la forma predicha por el modelo estándar de Friedmann-Lemaître, hasta alcanzar un tamaño mucho mayor que los aproximadamente 14 mil millones de años-luz de extensión de nuestro universo observable actual.

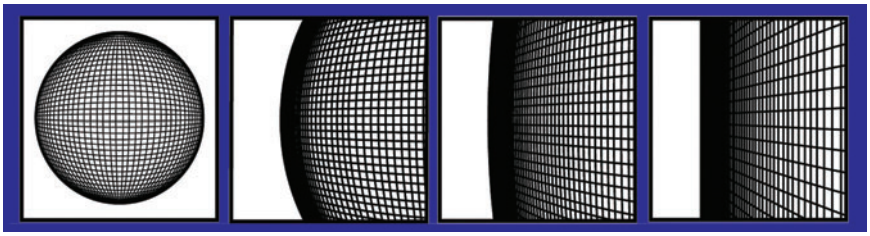
Así es cómo regiones "aparentemente" distantes y sin conexión causal "hoy", en la realidad (y gracias a la inflación) sí habrían tenido el tiempo de uniformarse "antes" de la inflación y de alcanzar un equilibrio térmico. Comenzada la inflación, la extraordinaria expansión superlumínica del espacio habría separado a estas regiones tanto que, de no saber de la existencia del mecanismo inflacionario, nos resultaría hoy paradójico que nos mostrasen tan idénticas características. Así es cómo la inflación resuelve, en forma que casi llamaríamos trivial, el problema del horizonte en los modelos del Big Bang.

La inflación, dijimos, habría convertido un diminuto volumen del universo primitivo en un espacio inmenso, de volumen mucho mayor que el de nuestro universo observable actual. Este mecanismo habría así homogeneizado tan efectivamente nuestro universo observable, que aún hoy, miles de millones de años más tarde, generaciones de cosmólogos observan los efectos de su accionar. Y lo que es más, lo seguiremos observando por muchos miles de millones de años más. ¿Exactamente cuántos? Pues bien, como en el caso de los monopolos y de la planitud espacial, aquí también, el futuro del universo observable dependerá de cuán larga fue (si realmente "fue") la etapa inflacionaria que liberó al modelo estándar de sus problemas.

Hasta aquí hemos desarrollado el lado positivo de la inflación y enumerado los problemas que ayuda a resolver. No sería justo, sin embargo, pensar que encontramos la panacea universal. La inflación padece de ciertos puntos oscuros que aún faltan explicar. Algunos de estos puntos se relacionan con una adecuada y necesaria inserción del período inflacionario en las teorías de física de las altas energías (teorías de gran unificación) donde el inflatón, por el momento, está sólo metafóricamente relacionado con algún campo primordial, que en efecto existe en dichas teorías. Aparte de esto, aún existen en los modelos de la inflación ciertos parámetros fundamentales que deben ser "sintonizados" a

valores inexplicablemente muy pequeños (y antinaturales en física) para que las predicciones concuerden bien con las observaciones en la radiación cósmica de fondo y en la distribución actual de las estructuras astrofísicas.

Por último, el propio mecanismo que yace en la raíz de la expansión acelerada –esa "fuerza" que, como ya mencionamos, impulsa al universo en esta etapa primordial, previa a la evolución estándar de Friedmann-Lemaître– está relacionado con formas de materia-energía que no cuentan con un adecuado marco teórico que las explique. Este último problema de la inflación se conecta en forma estrecha con el famoso problema de la constante cosmológica. Esa suerte de fuerza cósmica repulsiva que Einstein introdujera en sus ecuaciones de 1917 y cuya existencia y valor al día de hoy no han podido ser justificados por la teoría.



● El problema de la planitud espacial y la solución propuesta por la inflación cosmológica. Un período de expansión acelerada revierte el comportamiento del parámetro Omega con la expansión (Omega es el cociente entre la densidad real de materia-energía y la densidad crítica). Mientras que en el modelo estándar (no inflacionario) Omega se apartaba rápidamente de la solución plana Omega=1, durante la expansión inflacionaria Omega converge a la unidad, y lo hace tan rápido como pronunciada es la expansión del universo. En la figura vemos un esquema simplificado (con una dimensión espacial menos) de lo que sucede: la curvatura espacial de nuestro espacio físico (visible en las primeras imágenes de la izquierda) se pierde rápidamente con una expansión pronunciada, hasta hacerse prácticamente indistinguible de un espacio plano (última imagen de la derecha). El valor de Omega al finalizar la inflación queda tan próximo a 1, que miles de millones de años de evolución no inflacionaria posterior (donde Omega se aparta de 1) no han logrado alejarlo en forma significativa, como hoy, en efecto, se observa.

■ Semillas gravitatorias primordiales

Uno de los más importantes problemas de la cosmología es saber cómo surgieron las grandes estructuras astrofísicas que hoy abundan en el cielo. ¿Por qué vemos tantas y tan variadas formaciones de planetas, estrellas y cúmulos? Pues bien, este interrogante está estrechamente ligado a conocer el origen de las semillas gravitatorias primordiales a partir de las cuales todos los objetos celestes, incluyendo nuestra propia galaxia, el Sol, la Tierra (¡y nosotros mismos!), se habrían formado.

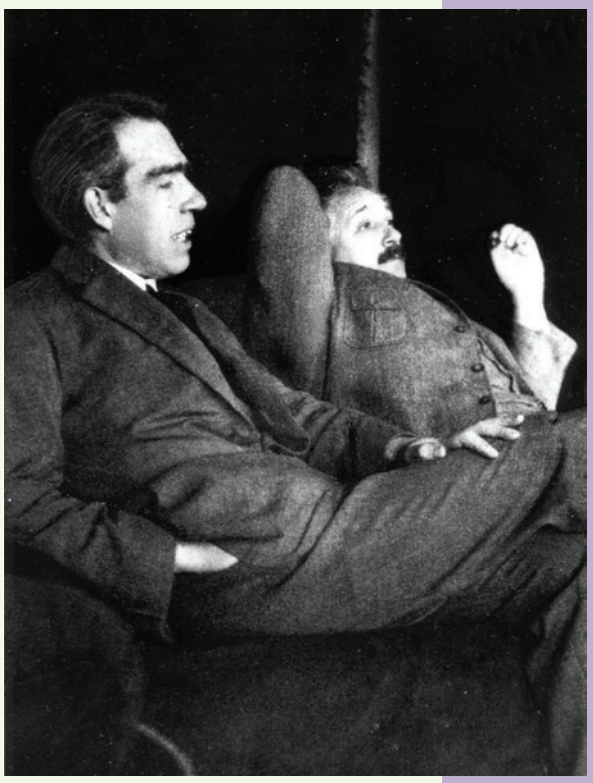
Antes del advenimiento de la Inflación Cósmica no había virtualmente ningún me-

canismo plausible para generar las semillas necesarias. Por supuesto que existían proposiciones, pero no parecían demasiado realistas. Quizás las estructuras se habían formado a partir de perturbaciones primordiales "arremolinadas", una suerte de gigantescos torbellinos como los propuestos por filósofos de la naturaleza del siglo XVII, como René Descartes, y que alterarían la uniformidad de la materia, generando grandes aglomeraciones. O quizás las inhomogeneidades habían surgido de colosales explosiones de supernovas, o tal vez de la formación de ubicuos agujeros negros primordiales. Ninguna parecía razonable, dadas las observaciones astrofísicas, que se encargaban rápidamente de descartar una y otra posibilidad. Quizás las pequeñas inhomogeneidades primordiales estaban ya "allí", simplemente, surgidas de los propios instantes embrionarios de los modelos del Big Bang. Esta última idea era simple, pero no explicaba gran cosa; tan sólo postulaba la existencia de lo que de otra manera no se lograba obtener: era invocar "condiciones iniciales" adecuadas, algo que los cosmólogos simplemente aborrecían hacer.

La situación dio un vuelco favorable con la inflación. En pocas palabras, la inflación, con la gran expansión del espacio que conlleva, primero "suaviza" cualquier tipo de inhomogeneidad que pudiera existir en el pequeño volumen bajo estudio. Esto hace al mecanismo en gran medida independiente de las condiciones iniciales previas al proceso inflacionario y es algo muy positivo. Pero la homogeneidad no durará mucho tiempo, pues el campo de la inflación, como todo campo físico, sufrirá pequeñas fluctuaciones cuánticas de energía. Estas fluctuaciones se desarrollarán en las dimensiones microscópicas del pequeño volumen, pero rápidamente y gracias a la expansión explosiva que sigue, se estirarán hasta alcanzar dimensiones "macroscópicas" y mucho más, hasta alcanzar incluso inmensas dimensiones astronómicas. En algún momento la fase inflacionaria terminará, y toda la energía que la impulsaba será trasladada a otros campos primordiales que luego darán origen a la radiación y a la materia. Durante la expansión de Friedmann-Lemaître de la cosmología estándar que seguirá, algunas de estas fluctuaciones cuánticas, ya convertidas en perturbaciones de densidad de talla astronómica, contarán con las características adecuadas como para iniciar el proceso de formación de estructuras astrofísicas.

Serían entonces éstas (las fluctuaciones de origen cuántico en el campo que impulsa la inflación) las tan buscadas semillas primordiales, y aquellas que luego crecerían a través del proceso de la inestabilidad gravitacional, como lo explicamos más arriba. Volviendo a nuestro interrogante inicial, acerca de cuál había sido el mecanismo encargado de plantar las semillas gravitatorias primordiales, hoy la balanza se inclina hacia el lado de la inflación. Y las más recientes observaciones astrofísicas parecen avalar esta conclusión con creces. Y esta concordancia entre teoría y observación es mucho más importante de lo que parece a simple vista. En efecto, además de proveernos las fluctuaciones primordiales, cuyo origen era completamente oscuro antes del advenimiento de la inflación, el mecanismo descripto, de ser en efecto cierto, sería una prueba irrefutable del papel clave que

juega la física cuántica (cuyas reglas rigen el comportamiento de las partículas en el reino de lo microscópico) en darle forma a las grandes estructuras astrofísicas. Como lo expresara en una conferencia de 1937 el físico danés Niels Bohr (1885-1962), uno de los principales actores en el desarrollo de la cuántica, "sólo comprenderemos el origen y la estructura del universo cuando hayamos primero comprendido cómo las leyes de la mecánica cuántica operan sobre las partículas fundamentales". Las últimas observaciones indican una armoniosa amalgama entre estos extremos aparentemente tan distantes de la física contemporánea, como en efecto lo predijera Bohr más de setenta años atrás.



● El célebre físico danés Niels Bohr, en una conversación con Albert Einstein en diciembre de 1925. Un visionario en el más prestigioso sentido de la palabra, fue Bohr quien por primera vez comprendiera que era necesario un acabado conocimiento de la física microscópica dictada por la mecánica cuántica para poder explicar, algún día, los más intrincados secretos del cosmos.

■ La formación de estructuras astrofísicas

En el universo primordial, las altas temperaturas reinantes hacían que la materia se hallase totalmente ionizada. En este estado, la radiación estaba completamente acoplada a la materia mediante continuas interacciones entre los fotones y las partículas cargadas. Pero con la expansión, la temperatura del universo descendió, y llegada a unos pocos miles de kelvin, los electrones, hasta entonces libres, se combinaron con los núcleos para formar los átomos neutros. Es aproximadamente en esa época, que la dinámica del universo pasará a ser efectivamente dominada por su contenido en materia neutra ordinaria, con una densidad de radiación que, poco a poco, se hace cada vez menos importante.

Este cambio en el tipo de materia-energía que domina el universo tendrá consecuencias sumamente relevantes, pues no debemos olvidar que en las ecuaciones de Einstein es la materia-energía la que determina la geometría del espacio-tiempo. ¿Y a qué se debe

entonces este cambio en el contenido energético de nuestro universo? Pues bien, se debe a que, si bien tanto la densidad de energía de la radiación como la de la materia disminuyen con el aumento del volumen del universo (la expansión), la energía de los fotones además se corre al rojo. Y esto genera una disminución adicional en la frecuencia (o energía) del campo de radiación. Así pues, la radiación domina en los primeros instantes de la vida del universo, durante la llamada "época dominada por la radiación" (y la nucleosíntesis primordial sucede en esta época). Pero como su densidad disminuye más rápido que la de la materia, llegará un momento en el que ambas contribuciones se igualarán. Llamaremos a este momento la "época de la igualdad entre materia y radiación", y este evento sucede cuando el universo tiene aproximadamente varias decenas de miles de años de vida. En tiempos posteriores a la igualdad, será la materia ordinaria la que dominará el universo (aunque no por ello la radiación dejará de ser importante) y nos hallaremos en la llamada "época dominada por la materia". El desacoplamiento final de la radiación y la materia, que ya mencionamos antes, sucederá más tarde en la historia del universo, a los 400.000 años de vida, más o menos, lo que indica claramente que, pese a que la componente de radiación no domina ya más el universo, su influencia (y su capacidad de destruir los primeros átomos que intentan formarse) es determinante.

Así, con la densidad de radiación subdominante y desacoplada de la materia ordinaria, ya no existe impedimento para que los primeros grumos de materia comiencen a estructurarse, y entonces los primeros átomos, luego moléculas y más tarde sistemas cada vez más complejos se irán aglomerando, atraídos por la gravitación, para formar los cuerpos astrofísicos que nos rodean hoy.

■ Los fundamentos del Big Bang

Los temas que hemos venido discutiendo en este capítulo nos guían naturalmente hacia los modelos del Big Bang y, en forma algo más especulativa, hacia los modelos del Big Bang inflacionario. Estos son la consecuencia inevitable de toda una serie de conceptos fundamentales y, sobre todo, de diversas constataciones recogidas de las observaciones astrofísicas. Como ya lo mencionamos más arriba, una primera prueba observacional es el tamaño inmenso de nuestro universo. La verificación científica de un universo sin límites sólo se pudo realizar en el siglo XX. Edwin Hubble lo mostró por 1920, reconociendo que existen sistemas astrofísicos y galaxias ubicados mucho más allá de nuestra vecindad astronómica. En el presente, potentes telescopios efectúan sorprendentes hallazgos de nuevos y lejanos sistemas –incluso de sistemas de planetas extrasolares– en forma sistemática, casi podríamos decir, rutinaria.

Un segundo indicio en favor de los modelos del Big Bang es la constatación de que el universo se encuentra en expansión. Esta es una importante realización que vino de

las observaciones pioneras de Slipher y de Hubble, y de un sinnúmero de astrónomos en los años sucesivos. Sin embargo, esta verificación es en cierto sentido indirecta. Se basa en el alejamiento de fuente y receptor (bien aproximado por el efecto Doppler-Fizeau para bajas velocidades) debido a la expansión (o estiramiento) del espacio entre estos, que es, en la práctica, el responsable de que la frecuencia de la radiación detectada disminuya. Este efecto produce un aumento de la longitud de onda de todo el espectro de la radiación que detectamos de las galaxias –un corrimiento hacia el rojo– y es precisamente este corrimiento del espectro el que nos indica la velocidad de recesión. Si bien es cierto que algunos científicos desconfiaron de este método para verificar la expansión del universo, todas las explicaciones alternativas han fallado. Hoy en día hay un consenso casi total en favor de la expansión predicha por los modelos del Big Bang.

Un nuevo punto importante: la dinámica del sistema solar, de grupos de estrellas y demás conglomerados astrofísicos está regida por la gravitación. Si bien existen otras interacciones posibles, como por ejemplo la electromagnética, a las escalas del universo la gravitación es la dominante. Y esto, pese a su comparativamente menor importancia en la experiencia diaria –sabemos bien que lo que atrae entre sí dos imanes no es una consecuencia de sus masas–. La gravitación es la interacción que "pilotea" la evolución de nuestro universo global. Un punto adicional, esta gravitación universal está descripta por la teoría de la relatividad general einsteniana. Y aquí uno podría guardar un cierto escepticismo, pues aunque la relatividad general describe con un altísimo grado de precisión todo lo que ocurre en el sistema solar y en la dinámica de una estrella, no por ello deberíamos concluir que a escalas mucho mayores –la del universo por ejemplo– la misma teoría debe ser buena.

Sin embargo, si aceptamos a la relatividad como la descripción del universo, como lo indican todas las observaciones hasta ahora realizadas, sabemos que, como explicáramos más arriba, el universo se describe como una entidad a la que llamamos espacio-tiempo. Sabemos además que las propiedades geométricas de este espacio-tiempo dependen de su contenido energético (materia, radiación electromagnética y otras formas de energía). Es útil aquí imaginar una analogía bidimensional: la de una superficie de goma (representando al "espacio-tiempo") que se deforma (se "curva") al colocar una bolita de acero representando a una "estrella masiva". Ejemplo burdo, por supuesto, pero ilustra la forma en la que la presencia de materia altera drásticamente el espacio a su alrededor.

En la cosmología que surge de los modelos del Big Bang está implícita una hipótesis de simplicidad: que el mismo marco teórico de la relatividad general describe no sólo la evolución de los objetos astrofísicos compactos y de los sistemas planetarios más diversos, sino también al universo en su totalidad.

De allí se deduce que la evolución temporal del cosmos dependerá de su masa (o, mejor dicho, de su densidad de masa) y de su energía: si su contenido en energía ordinaria es muy alto, la atracción gravitatoria entre los constituyentes tenderá a frenar la expansión.

Fruto de este freno, el universo podrá, eventualmente, colapsar bajo su propio peso –como una flecha que, lanzada hacia arriba, se frena y cae–. Por el contrario, un contenido relativamente bajo en su densidad de materia nos llevará a un universo en eterna expansión, como un cohete al que le conferimos una velocidad mayor que la de escape (de unos 11 km/s) y que logra liberarse para siempre de la gravitación terrestre.

■ El principio cosmológico

Entre las ideas principales que guían al cosmólogo en su búsqueda del modelo correcto del universo, se encuentra el llamado principio cosmológico. Para entender lo que este principio significa, recordemos las visiones cosmológicas de la antigüedad: se afirmó primero que el universo tenía un centro, que ese centro era la Tierra; luego el Sol, que el universo estaba limitado por la esfera de las estrellas fijas; después que ya no existía dicha bóveda de estrellas, y muchas otras ideas más.

Pues bien, el principio cosmológico afirma todo lo contrario: todos los puntos son equivalentes, el universo no posee ni centro ni borde: el universo es homogéneo. Quizás ahora una idea tal parezca natural. Sabemos, sin embargo, que no fue así durante milenios. Podríamos decir que el principio cosmológico es una hipótesis de modestia y de igualdad, y por lo tanto una generalización del principio copernicano.

Pero, claramente, esta hipótesis no se verifica en nuestro sistema solar o en el interior de nuestra galaxia, ya que en estos lugares no vemos la homogeneidad. El verdadero rango de aplicación lo obtenemos tendiendo hacia las mayores escalas imaginables, aunque todavía menores que el tamaño de nuestro universo observable que cuenta con varios miles de megapársecs (donde, recordemos, 1 megapársec, o Mpc, corresponde a 3,258 millones de años-luz). Esto es, si dividiéramos el universo observable en volúmenes con tamaños característicos de unos pocos cientos de Mpc, el principio cosmológico afirma que no notaríamos la diferencia entre uno u otro. Este principio cristaliza una hipótesis fundamental de la física, de su validez objetiva e independiente del observador. Ningún observador es privilegiado, no hay un observador en el centro o en el borde, no hay ni centro ni borde del universo. Pero el principio cosmológico no sólo enuncia que el universo es homogéneo, también afirma que no hay dirección privilegiada, que no existe un "eje del universo" o, puesto aún más simplemente, que no tiene sentido hablar de un "arriba" o un "abajo". De más esta decir que esta hipótesis suplementaria (que se llama isotropía) también está de acuerdo con las observaciones.

Recapitulemos lo que estuvimos viendo. Y no debemos olvidarnos de mencionar dos de los más importantes pilares que sustentan el edificio de la cosmología moderna y que fueron tratados más arriba: la existencia y características de la radiación cósmica del fondo

de microondas y la predicción de las abundancias de los elementos más livianos generados durante la época de la nucleosíntesis primordial.

Vimos que en ambos casos, los cálculos teóricos coincidían asombrosamente bien con las difíciles observaciones astrofísicas. Notemos aquí, que la teoría de la radiación de fondo emplea métodos que involucran a la "física de plasmas", y de la interacción de la radiación con la materia ionizada, cuando el universo contaba con unos 400.000 años de vida. Por otro lado, la nucleosíntesis primordial emplea métodos teóricos de la "física nuclear", con una física operativa cuando el universo contaba con alrededor de unas centésimas de segundo de vida. Ambos métodos, muy dispares y empleados en muy diferentes condiciones físicas, coinciden en las predicciones cosmológicas, esto es como un "sello de garantía" para los modelos del Big Bang.

La nucleosíntesis, en particular, es una sólida evidencia de que estos modelos cosmológicos proveen una descripción precisa del universo desde que éste contaba con tan sólo 0,01 segundos de vida. La extensión inflacionaria, como ya lo vimos, quizás nos permitiría ir mucho más atrás en el tiempo; sin embargo, como también lo señalamos, la idea de la inflación, pese a ser muy exitosa en resolver muchos de los problemas de los modelos del Big Bang, precisa aún encontrar un marco adecuado en la física que describe la energía y la materia en épocas extremadamente primordiales, tales como cuando el universo tenía apenas unos 10^{-35} segundos de vida.

Resumiendo, si aceptamos todas estas observaciones y conceptos de humildad ya mencionados, no hay dos caminos posibles. Sólo los modelos del Big Bang satisfacen estos requerimientos. Concluyamos entonces, enunciando lo que se propone con los modelos del Big Bang. Se afirma en primer lugar que el universo se encuentra en una fase de expansión global desde hace aproximadamente unos 14 mil millones de años. Es ésta la cifra que generalmente se considera cuando se habla de la "edad" de nuestro universo. Como consecuencia inmediata, sabemos que nada puede ser más antiguo que esta cifra, hecho que se confirma día a día cuando detectamos objetos astrofísicos lejanos y por ende viejos. Como sabemos bien, la luz tarda un tiempo finito en viajar desde una galaxia cualquiera hasta la Tierra. Al detectar su radiación, en realidad estamos observando la galaxia en el estado en que se encontraba cuando la luz que recibimos fue emitida, hace millones y millones de años. Hasta el día de hoy, ningún objeto astrofísico observado resultó ser más viejo que unos 14 mil millones de años.

Otra predicción de la cosmología del Big Bang, consecuencia directa de esta expansión, es la constatación de que el volumen del universo aumenta y, como lo muestran las leyes de la física, se enfría. La materia que contiene el cosmos se reparte en espacios cada vez más grandes, diluyéndose y enfriándose con el pasar del tiempo. Este enfriamiento global permite, como ya lo señalamos, la formación de los primeros núcleos, átomos y moléculas livianas y, de ahí en más, estructuras cada vez más complejas que comenzarán a aglutinarse bajo la atracción gravitatoria, formando, luego de miles de millones de años, las estructuras astrofísicas que hoy nos rodean.

Actividad 8: El principio cosmológico

Vimos antes que la isotropía del espacio nos indica que en cualquier dirección que observemos, las condiciones físicas del universo serán estadísticamente similares. Esto es válido a grandes escalas cosmológicas, mayores incluso que las características de los cúmulos galácticos. Claramente esto no se verifica en nuestro sistema solar, de dimensiones ínfimas comparado con el universo observable. La hipótesis de homogeneidad, en cambio, nos permite hacer con la imaginación algo que quizás nunca lleguemos a concretar en la práctica: viajar y observar distintas partes del universo. Homogeneidad significa que aquí en la Tierra o en cualquier otro punto arbitrario del cosmos veremos exactamente lo mismo a nuestro alrededor (nuevamente, en forma estadística).

Vemos aquí la incomodidad filosófica que todos, en distintos grados, deberíamos tener. Si bien la isotropía está bien comprobada desde nuestro puesto actual de observación (ya verificamos, por ejemplo, el alto grado de isotropía de la radiación cósmica del fondo de microondas), en cambio, no tenemos forma de verificar la hipótesis de homogeneidad (al menos por ahora). ¿Por qué suponer que en todas partes del universo las cosas deberían ser como aquí? Claro que a esta pregunta nosotros podríamos responder con otra de igual tenor: ¿Por qué pensar que las cosas deberían ser distintas?

La idea de que nuestra situación como observadores no es privilegiada, esto es, que el universo que nos rodea no es diferente del que rodearía a otros observadores situados en otras galaxias, está encapsulada en lo que se conoce como el "principio cosmológico". Un apelativo importante para denotar nuestra completa ignorancia sobre su veracidad. Una hipótesis de base sobre la cual se construye la teoría y cuya falsedad haría caer por tierra el edificio teórico de la cosmología.

El principio cosmológico, según una caricatura hecha por el profesor Hans Stephani, investigador en temas de relatividad general. La incomodidad filosófica de suponer que lo que nosotros observamos en nuestro limitado entorno astronómico debería ser lo mismo que para otros observadores en otros lugares del cosmos está bien ejemplificada en la afirmación que el pez padre menciona a su hijo: "El universo, hijo mío, es un gran estanque lleno de agua".

En resumen, cuando un observador afirma que el universo es homogéneo basándose sólo en lo que él ve, es decir, en que el universo es isótropo desde su punto de observación, ese observador está postulando el principio cosmológico. Sabemos que le falta información esencial sobre el estado del universo y que por eso postula la homogeneidad (ya que no puede verificarla por la observación).

¿Qué opiniones se podrían plantear acerca del principio cosmológico? ¿Se encuentra alguna similitud entre este principio y las ideas que rodearon a quienes postularon el heliocentrismo (en contra del geocentrismo que predominó en la cosmología antigua y medieval)?

¿Es válido hacer asunciones difíciles –o quizás imposibles– de verificar en la práctica? ¿Esto está relacionado con la necesaria construcción de "modelos" que encontramos en todas las áreas de la ciencia actual?

• Respuesta - Actividad 8:

El principio cosmológico surge de imponer que los modelos que representan nuestro universo sean lo más simples posible. El surgimiento de las ideas copernicanas, esto es, la imagen del universo en la que la Tierra ya no ocupaba el centro del cosmos, responde también a una idea de simplicidad: es mucho más simple de entender que sea la Tierra (cuerpo menor que el Sol) la que se desplace, y no que deba hacerlo la estrella madre de nuestro sistema solar. Aparte, si es el Sol el que ilumina a todos los planetas de nuestro sistema (y no sólo a la Tierra), ¿no es más lógico que sea el Sol el que se ubique en el centro, desde donde puede iluminar mejor a todo su cortejo planetario? Algunas de estas ideas estuvieron en la cabeza de muchos estudiosos del cosmos desde hace siglos, y culminaron en la obra de copérnico y en el modelo heliocéntrico, la nueva visión copernicana del universo.

Algunas hipótesis de la cosmología son realmente hipótesis de simplicidad. Esto es, en muchos casos no hay forma de verificar ciertas ideas (como la de la homogeneidad del universo) a través de observaciones y, por ello, pueden suponerse verdaderas, a menos que las observaciones las contradigan. De no hacerlo así, los modelos se vuelven mucho más complicados de expresar matemáticamente y quizás menos naturales. Sabemos que hoy no existe (en cosmología o en cualquier otra área del saber) un modelo que sea perfectamente real, esto es, que refleje fielmente la realidad de nuestro universo. Nuestras ideas se plasman en modelos, tanto más aproximados a la realidad cuanto más abarcadores y precisos sean, pero siempre habrá algún detalle que no sea bien representado. Se trata sólo de modelos. Sujetos a revisión y a continuo perfeccionamiento. Así es como funciona la ciencia, con sus hallazgos y sus limitaciones.

Actividad 9: isotropía versus homogeneidad

En un universo homogéneo todos los rincones del cosmos son iguales y evolucionaron de acuerdo a las mismas leyes de la física. Supongamos, entonces, que en un lugar cualquiera de dicho universo un observador verifica que en todas las direcciones ve lo mismo y que, desde su punto de observación, el universo es isótropo. ¿Qué se puede concluir a partir de estas afirmaciones?

Homogeneidad más isotropía alrededor de un único punto, ¿nos da idea de cómo es el universo como un todo? (Quizás convenga pensar un poco y proponer una solución a este interrogante, antes de seguir leyendo.)

Si el universo es homogéneo y en un punto cualquiera también se muestra isótropo, entonces “debe” ser isótropo desde cualquier otro punto de observación. En un universo homogéneo, isotropía alrededor de un punto implica isotropía alrededor de “todos” los puntos.

Como corolario de esto, en dicho universo no podremos jamás encontrar la situación de tener una montaña en medio del desierto (ejemplo que usamos en una actividad anterior). Pues dicho caso muestra un ejemplo de isotropía en un único punto y muy poca homogeneidad espacial. De idéntica manera, el universo no puede tener un "centro" ni ningún otro tipo de lugar especial.

Discutir en este contexto la siguiente frase célebre de Nicolás de Cusa (*La Docta Ignorancia*, 1440): "El mundo es una esfera cuyo centro se halla en todas partes y cuya circunferencia no se encuentra en parte alguna" (o quizás se prefiera consultar "*La Esfera de Pascal*" de Jorge Luis Borges.)

Mirar nuevamente estas tres imágenes:

Imagen 1

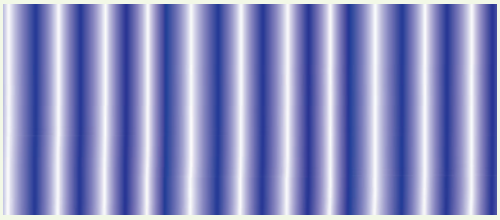
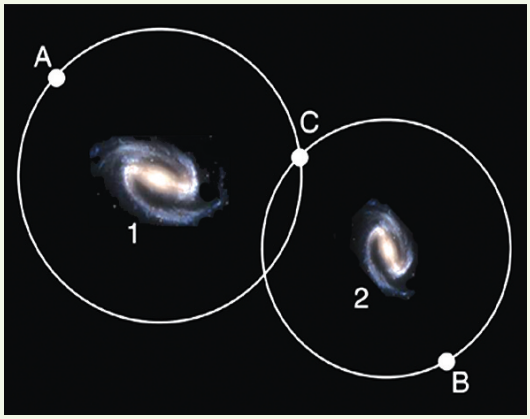


Imagen 2

Imagen 3

a- Homogeneidad en todo punto, ¿implica isotropía? (No. Ver imagen 2)
b- Isotropía alrededor de todo punto, ¿implica homogeneidad? (Sí. Ver imagen siguiente)



● Imagen 4

El universo observable resulta notablemente isótropo a nuestro alrededor (a escalas de distancias suficientemente grandes, por supuesto). Pero nosotros no podemos considerarnos observadores privilegiados (desde la época de Copérnico –y antes incluso– sabemos que la Tierra no tiene ningún lugar especial en el cosmos). Por eso, podemos imaginar que alrededor de cualquier otro observador el universo también resulta isótropo (esto es, suponemos isotropía alrededor de todo punto).

Elijamos ahora dos observadores, uno en la galaxia 1 (nosotros) y otro en la galaxia 2 (véase la imagen 4). Isotropía alrededor del observador 1 (nosotros) indica que todos los puntos de la circunferencia que rodea a 1 mostrarán lo mismo. Luego, las condiciones físicas en dos puntos cualesquiera de dicha circunferencia, digamos A y C, serán las mismas. Lo mismo podemos hacer alrededor del observador 2, trazando su circunferencia, y afirmar que las condiciones físicas en dos puntos cualesquiera de dicha circunferencia, por ejemplo, B y C, serán idénticas. Pero vemos que el punto C pertenece a ambas circunferencias. Concluimos entonces que las condiciones físicas en A son idénticas a las de B (pues ambas son idénticas a las de C). Como este procedimiento puede llevarse a cabo para cualquier par de puntos, concluimos que todos los puntos de este espacio comparten idénticas condiciones físicas. En resumen, partimos suponiendo que el espacio era isótropo alrededor de “todo” punto y deducimos que el espacio es homogéneo. Más sucintamente: isotropía alrededor de todo punto implica homogeneidad.

"Astronomicum Caesareum" (Apiano)

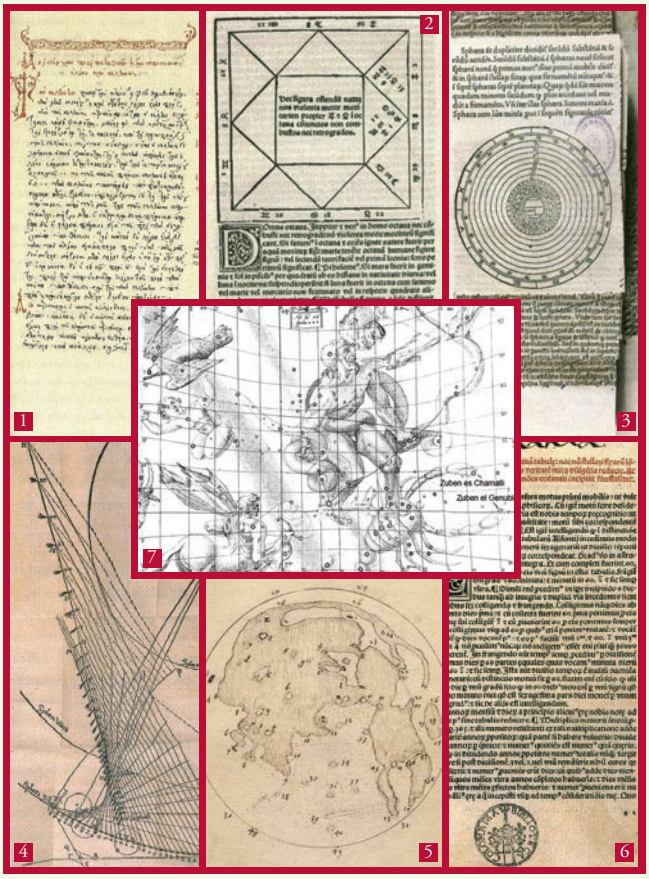


Fig. 1: "Sobre las dimensiones y las distancias del Sol y de la Luna" (Aristarco)
Fig. 2: "El libro de Astrología" (Abraham Ben Ezra)
Fig. 3: "Sphera Mundi" (Sacrobosco)
Fig. 4: "Astronomía Nova" (Johannes Kepler)
Fig. 5: Primer mapa de la luna (Thomas Harriot)
Fig. 6: "Tablas Alfonsinas" (Alfonso X, El Sabio)
Fig. 7: "De Stella Nova" (Johannes Kepler)

Capítulo 6

Planetas extrasolares

Desde hace mucho tiempo se especula con la posible existencia de vida extraterrestre. Científicos y visionarios de toda especie vislumbraban la posibilidad de formas de vida, en general similar a la nuestra (y con los estilos de vida y costumbres de aquellos que los imaginaban) pero instalada en otros astros del cielo, ya sea en las estrellas –el Sol incluido– como en los demás planetas visibles de nuestro sistema solar. Unos pocos pensaron, incluso, en que lo más natural para aquellas nuevas formas de vida sería que su habitat se hallase en condiciones similares a las de nuestra Tierra. Es decir, que el nuevo nicho de la vida fuese un planeta de tipo terrestre con temperaturas amables y duraderas en el tiempo, ubicado a una distancia prudente de la estrella madre, que de esta manera proveería la fuente de luz y energía necesarias para el sustento de la vida.

Pero hizo falta que pasara mucho tiempo para que estas ideas algo exóticas tuvieran un primer contacto con la realidad. El descubrimiento de planetas ubicados fuera de nuestro Sistema Solar, a los que los astrónomos llamaron planetas extrasolares, o directamente exoplanetas, es un hecho muy reciente.

Recordemos que los planetas no tienen luz propia, sino que reflejan (parte de) la luz que reciben de la estrella que los ilumina. Si pudiéramos alejarnos a una distancia de unas 40 unidades astronómicas del Sol (la distancia a la que se halla Plutón del centro de nuestro sistema solar –la Tierra se encuentra a 1 UA) y mirásemos hacia el Sol, nos resultaría sumamente difícil poder ubicar a la Tierra o a Venus (y ni hablar de querer fotografiar a la Luna desde allí). ¿Por qué? No porque nuestros telescopios –ubicados en la órbita de Plutón– no puedan detectar el tamaño de estos planetas, sino porque la intensa luminosidad del Sol nos encandilaría. En otras palabras no basta con sacar una foto –en cualquier longitud de onda de la luz que se nos ocurra–; hay que buscar métodos más sofisticados para intentar revelar una esferita pequeña opaca frente a una inmensa bola de gas incandescente que se hallan una junto a la otra (la luminosidad de Júpiter es tan sólo de una parte en 10^9 de la del Sol).

Hasta hace cerca de dos décadas atrás, no se disponía de instrumentos suficientemente sensibles para detectar cuerpos tan pequeños, distantes y poco luminosos. Fue necesario desarrollar nuevas técnicas e instrumental de detección con una precisión asombrosa, impensable cuando quien escribe estas líneas era un joven, quizás como el que ahora lee este escrito. Esto vuelve a despertar la imaginación, no sólo de quienes esperan algún día vivir el descubrimiento de vida extraterrestre, sino de aquellos astrónomos que buscan

nuevos sistemas astronómicos para estudiar dinámicas planetarias diferentes de las encontradas en nuestro propio Sistema Solar. Estos estudios les pueden servir de corroboración de las teorías cosmogónicas actuales (esto es, de formación de planetas y sistemas de planetas) que fueron desarrolladas basándose en el conocimiento de un único sistema planetario: el que nos alberga.

Claro que, como con toda nueva área de la ciencia observacional, surgieron preguntas básicas que había que intentar responder: ¿dónde buscar? ¿qué tipo de planetas se esperaría encontrar girando alrededor de otras estrellas? ¿serán similares al nuestro estos nuevos sistemas planetarios? ¿existirá algún grado de diversidad planetaria? Sobre estos interrogantes nos concentraremos en esta sección.[1]

■ ¿Cómo se formó nuestro Sistema Solar?

Como ocurre muy frecuentemente en la ciencia, no existe un único modelo para la formación de la Tierra y del resto de los cuerpos del Sistema Solar. Sin embargo, sí existe cierto consenso sobre algunos aspectos cosmogónicos importantes. Todas las teorías coinciden en afirmar que comenzamos nuestra existencia como una inmensa nube de gas y polvo cósmicos, similar a las observadas actualmente en muchas otras nebulosas que los astrónomos detectan con sus telescopios. Estas son las llamadas nubes protoestelares y tienen una extensión de cientos de unidades astronómicas.

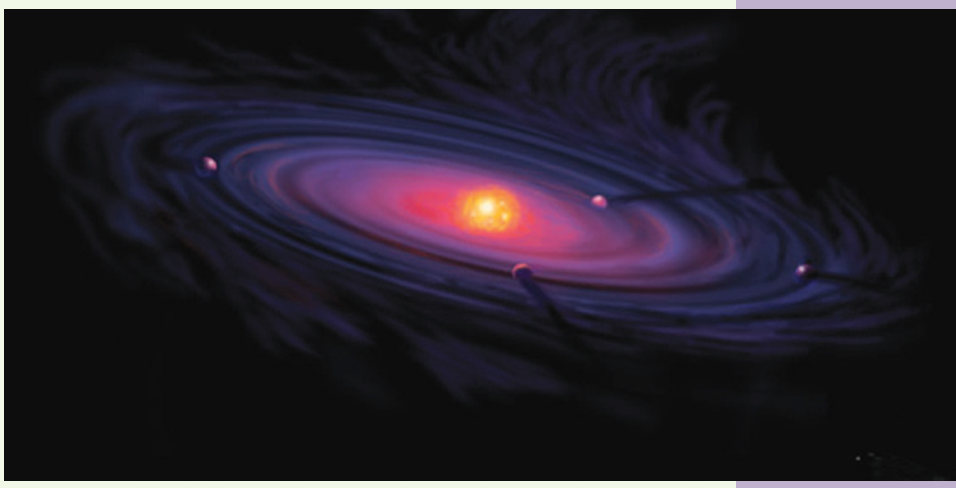
Como mencionamos antes, una Unidad Astronómica (UA) es la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, y vale aproximadamente unos 150 millones de kilómetros. Esta distancia promedio no significa que la órbita terrestre sea una circunferencia. Hagamos aquí un breve paréntesis para recordar que la órbita terrestre es una elipse y no una circunferencia, pero dado que la excentricidad de dicha elipse es tan pequeña, es más preciso pensar en términos de circunferencias que de elipses. Esto nos evita caer en problemas típicos de la enseñanza secundaria –y más avanzada aún– en donde la órbita elíptica de la Tierra (con el Sol en uno de los focos de la elipse) sería la responsable de que "en el verano haga más calor que en el invierno" (porque a veces se piensa que durante el verano nos hallamos más cerca del Sol que durante el invierno). Esta es una idea natural, errónea, es decir no científica, y es muy frecuente. A ella se enfrentan constantemente los educadores de temas astronómicos –la llamamos una *idea previa*–, y es tan inconsistente –puesto que sabemos que diferentes hemisferios no comparten estas estaciones– como difícil de erradicar entre los alumnos de cualquier nivel de la enseñanza formal).

Sigamos ahora con lo que veníamos contando sobre la formación de nuestro Sistema Solar. Con el tiempo, esta nube primordial se enfría y su tamaño se reduce hasta colapsar en una estructura achatada donde la mayoría de la masa logró caer hacia el centro (formando

[1] No siendo el autor un experto en este tema, en esta sección seguimos de cerca los trabajos de los astrónomos argentinos Cristián Beaugé y Valkiria Schulz. Los datos consignados fueron provistos por ellos.

lo que los astrónomos llaman un protosol), mientras que el resto de la nebulosa adquiere la forma de un disco, con un tamaño aproximado de unas 100 UA. Esta nube se compone principalmente de dos componentes: gas (en un 96%) y material sólido (un 4% aproximadamente). La presión interna de este sistema mantiene la estructura del gas, pero no de las partículas sólidas. Estas últimas caen hacia el plano de la nube y más cerca del protosol. Este proceso resulta en que el disco se divide en dos partes: una nebulosa gaseosa exterior (conformada por elementos livianos como los gases hidrógeno, helio y nitrógeno) y un disco compacto interior compuesto de partículas sólidas de menos de un centímetro de tamaño, conformado por elementos relativamente pesados como carbono, níquel, hierro, etc.

Estos pequeños grumos de materia van creciendo hasta conformarse los primeros planetesimales, que pueden alcanzar varias decenas de metros de radio (aunque su forma no es simple de catalogar y no tienen por qué ser esféricos). A partir de esta población de planetesimales, la siguiente evolución de la parte rocosa de la nebulosa inicial ocurre vía la combinación entre gravitación mutua entre todos los cuerpos y las colisiones que estos sufren. Los cuerpos de nuestro Sistema Solar muestran señas evidentes de estas colisiones, que se reflejan en la presencia de fragmentaciones y cráteres.



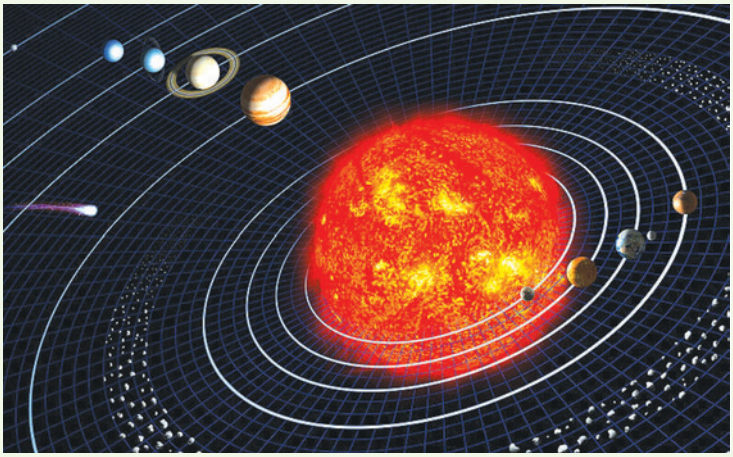
● Imagen de artista de un disco protoplanetario.

Si en los primeros instantes de este proceso, la velocidad relativa entre los cuerpos pequeños es suficientemente baja, las colisiones darán origen a un proceso constructivo que los astrónomos llaman acreción, y que es el mecanismo básico de formación planetaria. En un inicio la acreción sólo funciona para cuerpos sólidos y no sucede lo mismo con el abundante gas de la nebulosa madre. Sin embargo, como la temperatura del gas decae con la mayor distancia al Sol, existe un valor crítico de esta distancia tal que la temperatura del gas es suficientemente baja para que el componente volátil de la nube se condense. Esta distancia crítica se conoce como la "Línea del Hielo" y, en el caso particular de nuestro sistema solar, corresponde a aproximadamente 4 ó 5 UA. Más allá de ese límite, los elementos químicos livianos, como H, He y N, también participaron del proceso de acreción y dieron origen a planetas gaseosos, esto es, con alto contenido de elementos ligeros, a los que los astrónomos llaman planetas gigantes gaseosos. Ejemplos de estos últimos son Júpiter, Sa-

turno, Urano y Neptuno, es decir, los planetas clásicos que se hallan más alejados del Sol.

Al mismo tiempo que se formaban los planetas gaseosos, en la región más próxima de la protoestrella –el Sol futuro– los planetesimales continuaron creciendo lentamente hasta llegar a tamaños del orden de los 100 kilómetros. A los pocos millones de años, luego del colapso de la nube primordial, la nube de gas remanente comenzó a disiparse y así las etapas finales de formación de los planetas terrestres continuaron en un escenario prácticamente libre de gas. Pero no se puede decir que la formación de planetas haya proseguido en forma independiente uno del otro. La envergadura de un planeta como Júpiter –al que podemos llamar el gordo del sistema solar, pues su atracción gravitatoria es tal que se encarga de atraer hacia sí o de desviar cualquier viajero externo, como los cometas, que podría constituir un peligro para planetas como la Tierra– afectó en forma notable la formación planetaria, en algunos casos invirtiendo el proceso de acreción y provocando fragmentaciones en las pequeñas formaciones planetarias cercanas al planeta gigante. Esta fragmentación originó los asteroides que hoy encontramos entre las órbitas de Marte y Júpiter. Así, en unos 100 millones de años se fueron formando los planetas de tipo terrestres que vemos hoy con órbitas cercanas al Sol.

Esta es, a grandes rasgos, la idea estándar de cómo se formó el sistema solar. Así se explica la existencia de las dos clases de planetas que ya mencionamos: los cuerpos gigantes gaseosos y los terrestres. Los primeros: ricos en gas y localizados a grandes distancias del Sol; los segundos: pequeños, rocosos y preferentemente localizados cerca de la estrella madre. El proceso de formación, ya descrito, también explica la forma y características de las órbitas planetarias: éstas resultan ser prácticamente coplanares y de forma muy aproximadamente circular. Este escenario también explica el origen de los numerosos asteroides que abundan en el sistema solar y de los objetos constituyentes del cinturón de Kuiper, así como la existencia de anillos –ubicua para todos los grandes planetas gaseosos de nuestro sistema solar, y no sólo para Saturno– y las centenas de satélites que integran nuestro sistema. Este es el llamado modelo estándar de la formación de los planetas. Se puede decir que funciona muy bien y que consigue reproducir la mayoría de las características de nuestro Sistema Solar.



● Nuestro Sistema Solar, formado por una única estrella (el Sol) y ocho planetas que cumplen su movimiento de revolución alrededor de esta. Incluye además a las lunas que tienen muchos de estos planetas, así como también a varios planetas enanos, como Plutón, Eris y Ceres, el cinturón de asteroides ubicado entre las órbitas de Marte y Júpiter, y el espacio interplanetario. Los cometas que viajan en órbitas muy excéntricas y los cuerpos del cinturón de Kuiper también forman parte de nuestro sistema solar.

■ Planetas extrasolares

El primer planeta descubierto fuera de nuestro sistema solar data del año 1995, y fue fruto de los esfuerzos de los astrónomos Michel Mayor y Didier Queloz, del Observatorio de Ginebra. Este planeta cumple su órbita alrededor de una estrella del tipo secuencia principal, clasificación de estrellas a la que también pertenece nuestro Sol. La estrella se denomina 51 Pegasi, y está situada a 40 años-luz de distancia del Sol (o de nosotros, pues la luz tarda solo 8 minutos en viajar del Sol a la Tierra y 8 minutos son muy poco comparado con 40 años). Esta estrella tiene prácticamente el mismo tamaño que nuestro Sol.

Sin embargo, el planeta descubierto no es de tipo terrestre (o telúrico) sino que posee una masa aproximadamente igual a la mitad de Júpiter. Lo realmente sorprendente de este descubrimiento, sin embargo, es que la distancia del planeta a la estrella es tan sólo de 0.05 UA. Vale decir que se trata de un planeta gigante (mayor de Saturno) pero localizado a una distancia de su estrella seis veces más cerca de lo que Mercurio dista de nuestro Sol. Como lo describieron recientemente los astrónomos argentinos Cristián Beaugé y Valkiria Schulz, del Observatorio de Córdoba, lejos de tratarse de un caso aislado, este hallazgo de planetas gigantes ubicados a distancias ínfimas de su estrella central parece ser una característica común de muchos de los sistemas extrasolares que han ido apareciendo frente a los telescopios de los observadores.

Pero la historia de descubrimientos continuó (a pasos agigantados, como veremos). Apenas un año más tarde, en 1996, los astrónomos estadounidenses Geoffrey Marcy y Paul Butler descubrieron dos planetas adicionales. El primero orbitando la estrella 70 Virgo (cuya distancia a la Tierra es de unos 60 años-luz) y cuenta con una masa unas siete veces la de Júpiter. Se trata de un verdadero gigante entre los gigantes. El segundo planeta fue hallado alrededor de la estrella 47 UMa (a una distancia de la Tierra de 46 años-luz) y es algo más pequeño que el primero: cuenta sólo con poco más de dos veces la masa de Júpiter. En ambos casos los planetas son de gran masa, constitución gaseosa, pero con órbitas muy cercanas a la estrella.

En la actualidad, el "club" de exoplanetas cuenta con más de 300 "afiliados", de los cuales más de 60 fueron descubiertos durante el último año (meses más, meses menos). Pero hay otra novedad. Si hace años algunos visionarios imaginaban que la propiedad de poseer planetas no tenía por qué ser privilegio del Sol, y luego fueron descubiertos los exoplanetas, pensemos ahora: si nuestro sistema solar cuenta con muchos planetas (y demás cuerpos astronómicos ligados gravitacionalmente a nuestra estrella), ¿por qué los demás "soles" habrían de poseer tan solo un planeta? ¿por qué no podríamos detectar sistemas completos de planetas extrapolares?

Como era de imaginar, no pasó mucho tiempo antes de que comenzasen a detectarse estrellas con poblaciones múltiples de exoplanetas. En lo que va desde los primeros años

de descubrimiento hasta ahora, más de 30 sistemas cuentan con todo un séquito de planetas que acompañan a su estrella en su largo viaje galáctico. Los sistemas de planetas extrasolares más notorios son el de la estrella 55 Cnc (en la dirección de la constelación de Cáncer) con cinco planetas descubiertos, y mu-Ara (en la constelación de Ara, el Altar) con cuatro planetas conocidos. No es tener excesiva imaginación predecir que quizás todas las estrellas –genéricamente– cuenten con varios satélites que se muevan a su alrededor. Por ello los astrónomos de la actualidad ya no se limitan a buscar planetas sino sistemas completos de exoplanetas.

Detección de exoplanetas y sistemas de planetas extrasolares

Como ya mencionamos, es muy difícil observar directamente a los planetas extrasolares, pues su luminosidad es extremadamente débil si se la compara con la de la estrella que los "posee". Sólo los planetas muy calientes (no es el caso de la Tierra) emiten radiación en el infrarrojo en forma apreciable. Si los podemos observar es por su propiedad de reflejar la luz que reciben de su estrella, como es el caso de los planetas de nuestro sistema solar. Entonces, es claro que la búsqueda de planetas extrasolares sea muy reciente y que, como era de imaginarse, requiera métodos más sofisticados que una simple observación al telescopio.

Entonces, si no son simples de observar, ¿cómo saber que existen y comenzar a conocer sus propiedades? Como en muchas otras áreas de la ciencia, y de la astronomía en particular, la detección se hace por medio de métodos de observación indirectos. En el caso que nos ocupa, la existencia de exoplanetas se manifiesta por los efectos observables que su movimiento genera en la estrella. Es mediante estos métodos, que ya describiremos, que los astrónomos deducen la existencia de planetas alrededor de algunas estrellas, y también muchas de sus propiedades (como las masas y las formas de las órbitas).

Existen muchos métodos diferentes de detección de exoplanetas, y cada año surgen ideas nuevas de cómo diseñar métodos aun mejores y más precisos que los conocidos hasta el presente. Bastará aquí que contemos a grandes rasgos dos de estos métodos, para llevarse una somera idea de su funcionamiento.

El método más simple de comprender se llama método de tránsito. Consiste en observar disminuciones en el brillo de la estrella debido al pasaje de un planeta por su frente (por encima de "la cara de la estrella", podríamos decir). De idéntica manera que cuando presenciamos un eclipse total de Sol (debido a la intromisión de la Luna entre la Tierra y el astro), la intensidad de la luz (y todo tipo de radiación proveniente del Sol) disminuye en forma notoria (notoria hasta para las aves y los animales que, confundidos comienzan a prepararse para dormir), el pasaje de un pequeño planeta por el frente del disco brillante de una estrella hará que el brillo de ésta disminuya en una pequeñísima cantidad.

Un ejemplo más apropiado que el del eclipse de Sol es el caso del tránsito de Mercurio (o de Venus) frente al Sol. Mercurio transita frente al disco solar más de 10 veces por siglo. Venus, por su parte, no lo hace tan seguido, pero cada vez que se da uno de estos "tránsitos de Venus", el evento se convierte en una verdadera fiesta astronómica de carácter mundial. En cualquiera de estos casos, el pequeño planeta que pase justo entre la línea de visión del observador y la estrella causará un eclipse parcial de Sol (muy parcial). Así, una parte de la radiación del Sol será bloqueada por el planeta y, si nos dedicásemos a monitorear continuamente la intensidad de la luz del Sol, veríamos que, durante el tránsito del planeta, esta radiación disminuye sutilmente.

De idéntica manera, en el caso del tránsito de un planeta extrasolar, la disminución del brillo de la estrella lejana dependerá del tamaño del planeta (relativo al tamaño de la estrella) y servirá para brindarnos información de la masa del planeta (suponemos que estos planetas tienen forma aproximadamente esférica y que su constitución no será muy diferente de la de los planetas conocidos). El intervalo de tiempo entre eclipses sucesivos (o pasajes sucesivos frente a la cara de la estrella) permite deducir el período orbital del cuerpo, y por lo tanto su distancia aproximada a la estrella.

Como todo método observacional, este también tiene sus limitaciones: quienes lo emplean solo pueden observar planetas cuya órbita cruza en frente de la estrella (recordemos que no existe una dirección privilegiada en el universo, y que los planetas de otros sistemas solares muy bien pueden hallarse "inclinados" con respecto al plano de la órbita característico de nuestro sistema solar), y cuyo tamaño (pequeño, *ma non troppo*) logra generar un eclipse detectable con los instrumentos actuales. Ahora la buena noticia: la ventaja principal de este método es que estos proyectos de observación se pueden hacer con telescopios de bajo calibre (no todos cuentan con tiempo asignado en el telescopio espacial Hubble, por supuesto).

Esto implica que el número de proyectos que buscan detectar nuevos planetas extrasolares se ha multiplicado notablemente en los últimos años, involucrando incluso a los astrónomos amateur.

Una segunda técnica de detección y que, a juzgar por el número de descubrimientos ha brindado los mayores frutos hasta el momento, es la conocida con el nombre de método de detección Doppler-Fizeau o de la velocidad radial. Recordemos brevemente a qué llamamos efecto Doppler-Fizeau. Cuando una fuente de radiación (o equivalentemente de sonido) se halla en movimiento relativo al observador, la radiación emitida (o equivalentemente el sonido emitido) sufrirá una pequeña modificación en su frecuencia. Todos recordamos que, cuando un avión se acerca, su sonido nos resulta agudo y que, cuando se aleja, ese mismo sonido cambia en forma continua, aunque veloz, hacia frecuencias más graves. Lo mismo sucede con la frecuencia de la luz, aunque nuestros ojos no lleguen a detectarlo. Pero desde hace años los astrónomos sí son capaces de detectar cambios sutiles en la frecuencia de la radiación de las estrellas y pueden deducir su mo-

vimiento "radial" de acercamiento (o de alejamiento) hacia (o desde) la Tierra.

Ahora bien, la gravitación siempre actúa al menos entre dos cuerpos. Si nosotros caemos hacia la Tierra, la Tierra también cae hacia nosotros. Claro está, las masas involucradas son muy disímiles, y lo mismo sucede (aunque a la inversa) con los desplazamientos que sufrimos nosotros y que sufre la Tierra. Pero, si en nuestro lugar colocáramos a la Luna, la situación cambiaría. En efecto, no es cierto que la Luna gire en torno a la Tierra; la realidad es más bien que ambos cuerpos se trasladan en un movimiento de giro alrededor del "centro de masa" común al sistema Tierra-Luna. Si nosotros fuésemos observadores muy distantes del sistema solar y la Tierra emitiera luz como lo hace una estrella (mientras que la Luna no lo hiciera), desde la distancia veríamos que la Tierra va y viene en una danza extraña cuyo compañero del baile no nos es visible. Lo veríamos porque la luz emitida por esta Tierra "luminosa" cambiaría en forma periódica de frecuencia (la Luna da una revolución completa en algo menos de un mes; y el período de cambio de la luz de esa Tierra luminosa sería precisamente ese).

El caso de las estrellas con planetas es análogo. Las estrellas y los planetas extrasolares se atraen gravitacionalmente y, de acuerdo a la masa del exoplaneta, la estrella sufrirá más o menos el vaivén de este movimiento de giro mutuo. Así, aunque no sea posible observar directamente un planeta, podremos detectar un movimiento periódico de la estrella alrededor de un punto fijo (en centro de masa del sistema). El método Doppler-Fizeau consiste en detectar los cambios en la velocidad radial de la estrella respecto del observador (nosotros), causado por la existencia de uno o varios cuerpos. Es simple entender que la presencia de un solo planeta dará origen a un movimiento periódico y a una modificación también periódica de la frecuencia de la luz estelar que recibimos. La existencia de varios términos periódicos superpuestos en la señal recibida indicará la existencia de varios planetas. La cuestión es tener la capacidad de detectar estas señales y de lograr separarlas. Cada periodo será un reflejo de la órbita de cada planeta, y la magnitud de la velocidad radial será una indicación de la masa del cuerpo perturbador.

Aunque parezca complejo, la cantidad de astrónomos dedicados al estudio de exoplanetas nos indica que éste es el método más desarrollado. Hoy existen instrumentos con la suficiente sensibilidad como para detectar cambios en la velocidad radial de una estrella del orden de 1 metro por segundo (y capaces también de asombrarnos con estos números –una persona camina más ligero que esto). Sin embargo, este método también posee sus limitaciones. Entre las más notorias, sabemos que el método favorece la detección de planetas grandes y masivos, donde el tironeo gravitacional con la estrella madre será mayor, y será mayor también el efecto detectable. Algo similar ocurre para los planetas con órbitas más cercanas a la estrella, que serán favorecidos (en la lista de posibles detecciones) porque la atracción gravitatoria disminuye con el aumento de la distancia entre los cuerpos. Aquí se repite una limitación que ya habíamos encontrado con el método del tránsito: ambos métodos se inclinan hacia la detección de planetas más masivos

y próximos a la estrella. Entendemos, ahora, el por qué de las primeras detecciones de planetas extrapolares que describimos al comienzo de esta sección.

■ ¿Exoplanetas como la Tierra?

Los límites de detectabilidad actuales no permiten la identificación de planetas terrestres. Si, por ejemplo, pensamos en el método Doppler, se necesitan instrumentos capaces de detectar variaciones en la velocidad radial de una estrella con precisión del orden de los pocos centímetros sobre segundo (precisión cien veces mayor de lo que mencionamos antes). El problema es que la propia estrella no tiene por qué permanecer estacionaria durante su vida: las estrellas poseen sus propias variaciones en tamaño debido a sus propias pulsaciones, y este fenómeno físico nada tiene que ver con la existencia de planetas a su alrededor.

Sin embargo, nuevos métodos van surgiendo y los observadores adquieren mayor experiencia en detectar planetas fuera de nuestro sistema solar. Cada año se detectan planetas más y más pequeños. En el 2005, por ejemplo, se detectó un planeta alrededor de la estrella Gliese 876 con una masa sólo ocho veces mayor que la de la Tierra. Planetas como éste recibieron el nombre de súper-Tierras. Se deduce que son planetas menores que los gigantes,muy posiblemente de composición rocosa como la Tierra.

Hay aproximadamente una decena de súper-Tierras, aunque todas ubicadas a pocas centésimas de una unidad astronómica de sus estrellas madres. En consecuencia, no podemos decir que se trate precisamente de análogos a nuestro planeta. Sin embargo, los astrónomos están confiados en que se pueden detectar planetas tan pequeños como los instrumentos se lo permiten, y en que no parece existir ninguna indicación de que exista un límite inferior para el tamaño de los exoplanetas. Estas son buenas noticias para quienes tienen esperanzas de detectar un planeta como el nuestro, en el futuro no muy lejano.

Existen otras dos diferencias entre los planetas conocidos y aquellos que se han venido detectando fuera del sistema solar. La excentricidad (deformación con respecto a una circunferencia) de la órbita de la mayoría de los exoplanetas es muy grande, comparada con la de la Tierra y la de sus vecinos. A muchos astrónomos éstas les recuerdan más a cometas que a planetas como los de nuestro sistema solar. Finalmente, nuestro sistema solar tiene un Sol en su centro. ¿Podríamos imaginar un día con dos o más soles en el firmamento? Los astrónomos ya han detectado varias decenas de planetas en estrellas binarias (sistemas dobles) y varios también en sistemas estelares triples. Años atrás, estos sistemas no tenían ningún consenso entre los astrofísicos planetarios. Hoy existen grupos repartidos por todo el planeta que tratan de estudiar sus propiedades.

¿Y qué hay de la posible existencia de vida en estos, u otros, planetas extrasolares? Al momento es impensable querer determinar con seguridad si algún exoplaneta conocido

posee vida o no. A medida que se vayan conociendo mejor las condiciones físicas de los distintos cuerpos descubiertos, se podrá intentar especular sobre la "habitabilidad" de un planeta determinado, siempre según nuestros propios criterios de lo que realmente constituye lo que llamamos vida.

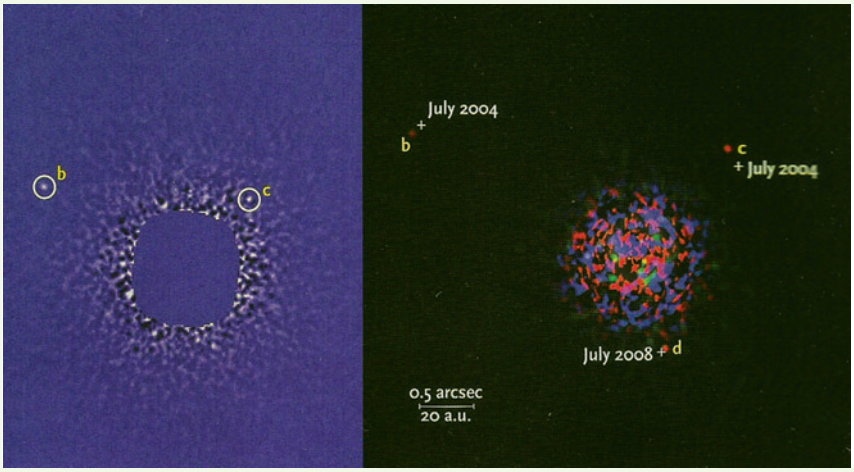
Quizás sería mejor comenzar preguntándose: ¿qué elementos fueron necesarios para que haya podido surgir, y sustentarse, la vida en un planeta como la Tierra? Si se consideran las condiciones necesarias para la existencia y evolución de la vida tal como la conocemos, la lista de requerimientos no es breve. Varias de las condiciones indispensables se deben encontrar en un equilibrio adecuado. Algunos requisitos necesarios son la abundancia de ciertos elementos químicos en los que se basa la vida (carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, azufre y otros elementos). También precisamos que no abunden los compuestos nocivos (como lo son el metano y el amoníaco). Debe existir, además, un adecuado rango de temperaturas en donde la vida pueda desarrollarse, así como también una fuente de energía que sea bastante uniforme en el tiempo y que no esté sujeta a grandes fluctuaciones (el Sol en su actual evolución en la secuencia principal cumple muy bien con estos requerimientos). Pero esto no es suficiente. Si miramos otros cuerpos pequeños del cosmos, veremos que algunos de ellos carecen de una atmósfera adecuada como la que nos rodea, y protege, en la Tierra. Así pues, es necesario un campo gravitatorio de la intensidad adecuada como para retener los gases de la atmósfera y evitar así su escape de las inmediaciones de la superficie terrestre. Pero no desearíamos un campo tan intenso que restringiese excesivamente la movilidad de los seres vivos en las capas superficiales de la Tierra (vivir en la superficie de una estrella de neutrones, donde una cucharadita de materia pesa lo que una montaña, no debe ser muy alentador). La atmósfera deberá contener gases adecuados como para que puedan absorberse las radiaciones ionizantes, como las de los rayos ultravioleta de alta energía procedentes del Sol, que son filtrados adecuadamente por la capa de ozono. Un campo magnético de la intensidad adecuada tampoco es algo para despreciar, pues su presencia desvía muchas de las partículas cargadas eléctricamente hacia los polos y limpia la atmósfera de sus hirientes interacciones.

Pero la vida en sí misma es algo compleja. Para la formación de tejidos y órganos especializados requiere ciertos elementos químicos en sus justas proporciones. Entre los elementos fundamentales para la vida, están el CHON, el fósforo (P) y el azufre (S), que se encuentran entre los más comunes en el universo, y el carbono (C) que es uno de los más importantes, debido a su capacidad de formar moléculas gigantes de gran variedad y complejidad (llamadas polímeros), como aminoácidos, proteínas, y ADN (ácido desoxirribonucleico).

En los otros planetas del cosmos estas condiciones quizás pueden variar un poco. Lo que parece fundamental es la presencia de radiación y de agua (con luz solar, un pequeño microorganismo puede quebrar el agua y liberar el oxígeno que ésta contiene y, si muchos lo hacen, pueden cambiar la composición de la atmósfera terrestre en sus inicios, dando lugar a un ambiente propicio para la vida como la conocemos hoy). Sin embargo, hay

especies que no requieren la presencia del oxígeno. Sabemos que existe la vida en lugares oscuros eternamente y sin acceso a ninguna fuente de luz, así como también en lugares insoportablemente calientes (para nosotros) o muy fríos, pero toda la vida que conocemos requiere de agua líquida en algún momento de su ciclo vital. Pero, quizás existan formas de vida que puedan desarrollarse sin agua líquida. No lo sabemos.

Si el agua debe permanecer en estado líquido, esto necesariamente requiere una fuente de calor. No es imprescindible que lo provea una estrella. Pueden existir fuentes térmicas o de mareas; así se cree que se mantienen los océanos ocultos de la luna Europa de Júpiter. Pero, en general, se piensa que es una estrella quien genera la fuente de calor necesaria a través de la radiación estelar, exactamente como sucede en el caso de la Tierra. De ser efectivamente así, si el exoplaneta se encontrase demasiado cerca de la estrella, el calor sería excesivamente intenso y todo el agua se hallaría en estado gaseoso. Por el contrario, si la ubicación del planeta fuese demasiado lejos de la estrella, todo el agua estaría congelada y de poca ayuda serviría a los procesos biológicos que sustentan la vida. Entonces, existe un intervalo de distancias alrededor de la estrella en donde el agua puede permanecer en estado líquido durante la mayor parte del año, por lo menos en parte del planeta. Esta es la región que los astrobiólogos llaman la zona habitable de la estrella. Su ubicación y extensión dependen, como podíamos imaginar, de su luminosidad (y en consecuencia, de



● El sistema planetario HR8799, ubicado a una distancia de 130 años-luz, en dirección de la constelación Pegaso. La imagen de la izquierda fue obtenida en marzo de 2008 por el telescopio Gemini Norte, ubicado en Hawaii. Dos planetas (extrasolares) de la estrella HR8799 se señalan con las letras (b) y (c). La imagen de la derecha fue obtenida en septiembre de 2008 por el telescopio Keck II, tambien de Hawaii, y muestra los mismos dos planetas, junto a un tercero, más interior, señalado con la letra (d). Las cruces indican las posiciones de los planetas en fechas anteriores, lo que muestra un signo claro de revolución orbital de estos planetas alrededor de su "sol", HR8799. Este sistema extrasolar tiene su plano (por donde se trasladan los planetas) orientado casi perpendicularmente a nuestra línea de visión. El planeta (d) tarda unos 100 años terrestres en efectuar una revolución completa a su estrella, mientras que el (c) y el (b) lo hacen en unos 190 y unos 460 años terrestres, respectivamente.

su temperatura superficial y de su masa). En el caso de una estrella de tipo solar, esta zona habitable se ubica aproximadamente entre 0,75 y 1,2 UA. Obviamente, la Tierra se halla en ese rango de distancias de su estrella (a 1 UA precisamente). Si la estrella tuviese una masa algo menor, dicha zona se correrá más cerca de la estrella; por el contrario, la zona se alejará de la estrella si el tamaño de esta última es un poco mayor que el de nuestro Sol.

Aún no se conoce ningún planeta extrasolar análogo a la Tierra que cumpla con todos los requisitos de habitabilidad. Pero, ¿por qué limitarse a los planetas? Vimos que existen muchos planetas extrasolares gigantes y sabemos que muchos de ellos se hallan en zonas habitables. Quizás alguno de estos exoplanetas tenga una luna del tamaño de la Tierra y allí pueda haberse desarrollado la vida. Aunque en el presente no es simple detectar lunas de exoplanetas, quizás sí lo sea en el futuro. En fin, las posibilidades son muchas y los astrónomos saben que nada impide que el futuro traiga descubrimientos inesperados.

Estrategias para buscar exoplanetas

Luego de más de una década de descubrimientos de planetas extrasolares, hoy los astrónomos cuentan con todo un menú de métodos distintos y complementarios para aumentar significativamente la lista de planetas orbitando otras estrellas del cosmos. Entre los diferentes métodos se cuentan: el bamboleo que la presencia de un planeta genera en la velocidad medida de la estrella madre (con casi 300 exoplanetas descubiertos al momento de escribir estas líneas); el bamboleo, no en la velocidad, sino en la posición de la estrella sobre el fondo del cielo (algunas pocas detecciones por ahora); la disminución en el brillo aparente de una estrella debido al tránsito del exoplaneta por su frente, lo que produce un ocultamiento muy parcial de la luz de dicha estrella que recibimos en la Tierra (unos 60 descubrimientos). También se han detectado planetas por efecto de lente gravitacional (alrededor de 10); por cronometraje de eventos estelares periódicos, como por ejemplo de las emisiones regulares de púlsares (unas pocas detecciones por ahora); y por toma directa de imágenes (también, unas pocas por ahora, dependiendo de a qué llaman planeta los astrónomos); etc.

Por supuesto, cada uno de estos métodos sirve para ciertas combinaciones planeta-estrella y no para otras. La pregunta que se han venido planteando los astrónomos desde hace un tiempo es: ¿cuál de estos métodos es el más adecuado para intentar detectar exoplanetas similares a la Tierra, esto es, planetas que cuenten con las características adecuadas que permitan la proliferación de la vida como la conocemos (o como ni siquiera la hemos imaginado hasta ahora)? Recientemente, la colaboración ExoPlanet Task Force ha sugerido que se deben hacer esfuerzos para poner en funcionamiento un telescopio de 2 metros dedicado exclusivamente a la búsqueda de exoplanetas por métodos de microlente gravitacional. Esto es, la observación dedicada y automática de muchísimas estrellas muy lejanas (estrellas "del fondo del cielo") que, repentinamente, aumentan en

forma notoria su brillo, que luego de un breve tiempo –típicamente, unos días– vuelve a su intensidad original. Esta magnificación, detectable con los métodos actuales, se origina por la presencia –por el pasaje aleatorio– de otro cuerpo celeste, quizás "invisible" de otra manera, ubicado entre las estrellas lejanas y nosotros, y responde a la concentración de los rayos estelares debido a la gravitación de dichos cuerpos. Esta es una predicción de la teoría de la relatividad general que indica que un objeto muy masivo (como una galaxia, un agujero negro, una estrella, pero también puede tratarse de un planeta como Júpiter) puede curvar notoriamente la trayectoria de la luz de una estrella aún más lejana (una estrella brillante del fondo del cielo). Cuando una estrella de baja luminosidad o un planeta (los "deflectores" de la luz de dichas estrellas lejanas) atraviesa la línea de visión del observador, se induce un patrón de aumento y posterior disminución de la luminosidad característicos. Más aún, si el deflector es un pequeño sistema extrasolar (una estrella de baja luminosidad y algún planeta orbitando a su alrededor), el patrón de la luz detectada permite, incluso, detectar las características de dicho mini sistema solar (una variación de unos días, debido al pasaje de la estrella, superpuesta con una variación de unas horas, debido al pasaje del exoplaneta en su órbita).

La detección de la luz de las estrellas del fondo del cielo da claros indicios, a los astrónomos, sobre las características del cuerpo o sistema deflector.

Cuerdas Cósmicas

Comprender los fenómenos astrofísicos que nos rodean es uno de los desafíos más interesantes en cosmología. Como vimos, estudios observacionales sugieren que el universo no sólo contiene materia luminosa, que detectamos gracias a la emisión de algún tipo de radiación electromagnética. El universo estaría dominado por una componente extra de materia oscura de origen (quizá no bariónico) aún desconocido. Fogonazos de fotones, repentinos y altamente energéticos, aparecen en el cielo en forma de ráfagas de rayos gamma de procedencia extragaláctica. Extrañas partículas, aún no bien identificadas, se zambullen en la atmósfera terrestre con energías extraordinarias, produciendo lluvias de radiación y de nuevas partículas más livianas, y constituyen el enigma de los rayos cósmicos de ultra alta energía.

En estas, y tantas otras observaciones astrofísicas, las interpretaciones convencionales encuentran problemas fundamentales: no siempre los mecanismos estándar son capaces de explicar la variedad de fenómenos que el universo nos ofrece.

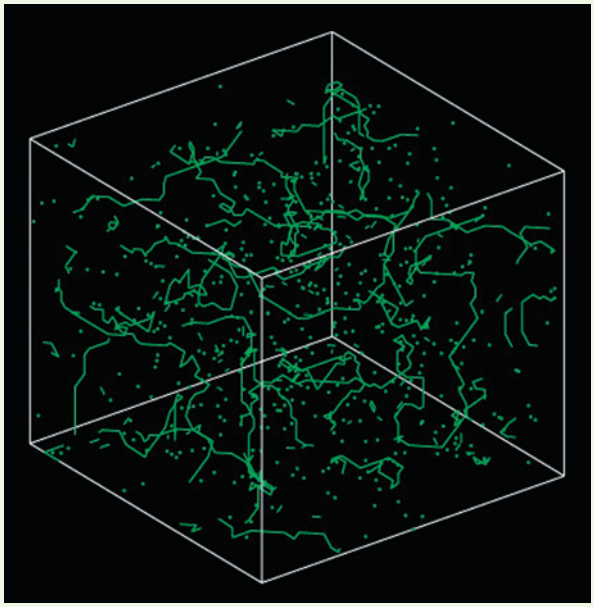
La cosmología estándar también sufre otros problemas, más fundamentales, para los que no tiene respuesta. Estos problemas están relacionados con el estado actual de nuestro universo. Por ejemplo, el hecho que la radiación cósmica del fondo de microondas (cuya existencia constituye uno de los pilares del modelo estándar de la cosmología) se evidencie con iguales propiedades, cualquiera sea la dirección en que llegue (lo que llamamos la isotropía). Esto sucede a pesar de que una multitud de regiones del universo de donde esta radiación procede, por ejemplo aquellas ubicadas en direcciones opuestas del cielo, nunca pudieron haberse comunicado en forma causal.

Otro problema cosmológico es el de la cantidad actual de materia en el universo. Observaciones de grandes estructuras astrofísicas indican que nuestro universo contiene una cantidad muy cercana a la llamada densidad crítica. Un poco más de masa y la atracción gravitatoria entre sus componentes sería suficiente como para detener la expansión (cuya observación forma otra piedra fundamental de la cosmología); un poco menos y nuestro universo se expandiría por siempre. Sin embargo, de acuerdo al modelo estándar del Big Bang, este valor crítico es inestable: si la energía es tan próxima a la crítica hoy, lo debió haber sido aun más en el pasado, con una precisión asombrosa de 15 cifras decimales cuando el universo tenía tan solo 1 segundo de vida. ¿Qué mecanismo fue capaz de afinar este valor con tanta precisión? Estos son tan sólo un par de interrogantes para los cuales no se conoce respuesta.

El modelo de la "inflación", propuesto por Alan Guth en 1981, provee la solución actualmente considerada más atractiva a estos problemas. Se basa en una expansión cuasi exponencial del universo cuando este contaba con aproximadamente 10^{-35} segundos de vida. Durante esta expansión acelerada todas las perturbaciones primordiales relevantes (diferenciadas por sus longitudes características), desde las galácticas hasta aquellas con tamaños comparables a nuestro universo actual, habrían sido empujadas fuera del (así llamado) "radio de Hubble", siendo este del orden de la máxima distancia de la cual hoy podemos recibir información. El radio de Hubble a un tiempo dado "t" corresponde aproximadamente a la distancia viajada por un fotón desde las épocas más primordiales de la evolución de nuestro universo (t cercano a la "singularidad") hasta el tiempo "t". Regiones del universo separadas por distancias mayores son consideradas desconectadas causalmente. Ninguna señal puede propagarse a velocidad mayor que la de la luz, es por eso que no existe ningún proceso microfísico entre estas regiones.

El modelo inflacionario supone que todas las perturbaciones cosmológicas que darán origen a las diferencias de densidad de materia necesarias para formar las galaxias y demás megaestructuras del universo, nacen de fluctuaciones cuánticas en el interior del radio de Hubble y, por lo tanto estarían causalmente conectadas. Esto explicaría el porqué hoy

detectamos la radiación de fondo tan altamente uniforme (a nivel de una parte en 100.000) en cualquier dirección del cielo hacia donde apuntemos nuestra antena. Más aún, durante la inflación la densidad de energía crítica resulta ser lo que los matemáticos llaman un "atractor", vale decir que la densidad de energía tiende naturalmente hacia ese valor, y esto explicaría por qué hoy vivimos en un universo tan próximo al crítico. Además, estas fluctuaciones cuánticas microscópicas primordiales serían enormemente "estiradas" y convertidas en perturbaciones clásicas en la distribución de la densidad de materia y, a través de la atracción gravitatoria, estarían en la raíz de la formación de galaxias y cúmulos galácticos.

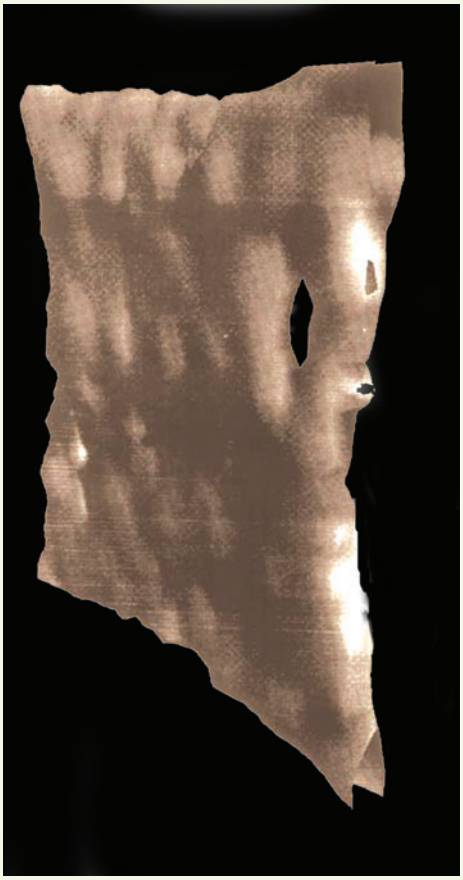


● Red de cuerdas cósmicas largas y lazos, obtenida de la simulación de la evolución de las fases aleatorias iniciales del campo de Higgs en una región del universo. En el caso de cuerdas dotadas de propiedades conductoras, los lazos podrían eventualmente alcanzar configuraciones de equilibrio (*vortones*) lo que impediría su desintegración radiativa. Una tal población de vortones podría poner en peligro al exitoso modelo estándar de la cosmología, a menos que las cuerdas se formasen a energías suficientemente bajas.

Sin embargo, la inflación no resuelve todos los enigmas. En particular, algunos de los parámetros de la teoría deben ser ajustados a valores artificialmente pequeños para que las estructuras astrofísicas generadas y la amplitud de las anisotropías inducidas en la radiación de fondo no sobrepasen excesivamente lo que se observa en la actualidad.

En esta sección exploraremos otra clase de modelos cosmológicos, la de los "defectos topológicos cósmicos". Estos son tan especulativos como los modelos inflacionarios, quizá más; pero sus predicciones teóricas son extremadamente interesantes y, lo que es más importante, quizás verificables en un futuro cercano.

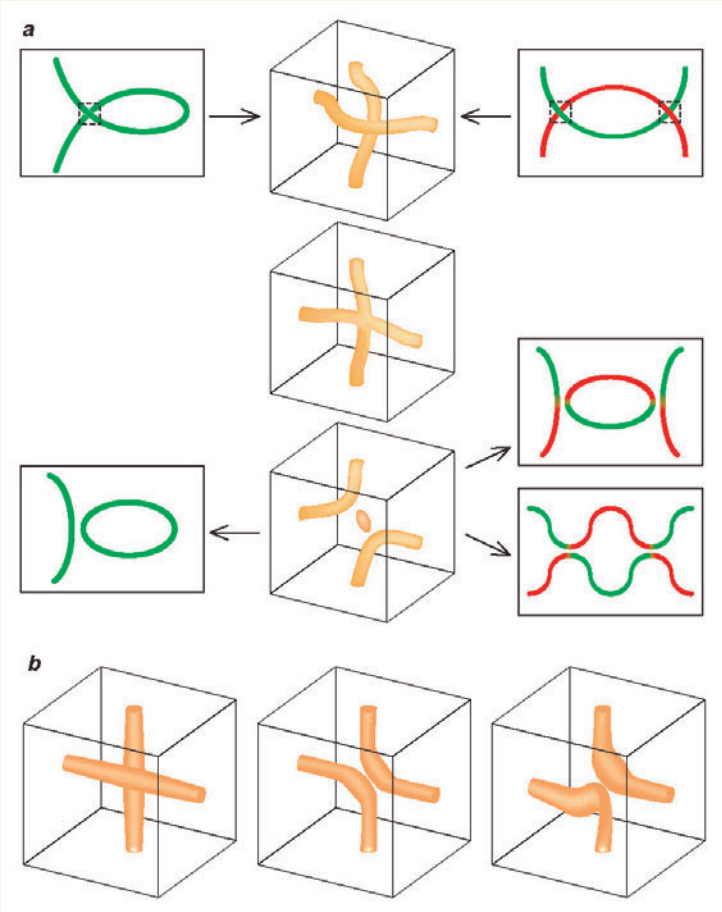
Los defectos topológicos se hallan en el punto de contacto entre la física de partículas, la cosmología y la física del estado sólido. Abren el camino para comprender el universo temprano a través de analogías con experiencias simples de laboratorio. Veremos que, si las ideas actuales basadas en extensiones del exitoso modelo estándar de partículas ele-



● Estructura astrofísica plana de alta densidad de materia generada a partir de la `estela' dejada a su paso por una cuerda cósmica con estructura microscópica (Figura cortesía de P. Avelino y P. Shellard).

mentales son correctas, la formación de defectos topológicos es inevitable. Además, estarán dotados de propiedades peculiares que en el pasado los han convertido en candidatos respetables para la explicación de una multitud de fenómenos, como la generación de anisotropías y de la polarización en el fondo de micro ondas, así como la generación de las pequeñas perturbaciones necesarias para la formación de galaxias.

Entre los modelos de defectos topológicos que existen en la actualidad, las cuerdas cósmicas son la variedad mas estudiada. No nos referimos aquí a las cuerdas 'fundamentales' que algunas teorías proponen como substitutos unidimensionales de las partículas elementales en el papel de entidades de base. Las cuerdas cósmicas son finas líneas de material primordial con una densidad de energía extraordinaria, que se desplazan a velocidades relativistas y que curvan el espacio que las rodea a su paso. Gracias a sus interacciones gravitatorias peculiares, las cuerdas son capaces de generar concentraciones de materia para la formación de grandes estructuras astrofísicas, perturbar estas estructuras generando velocidades de deriva, como las hoy observadas, hasta curvar rayos de luz procedentes de cuásares o galaxias distantes. Además, son capaces de perturbar el fondo cósmico de radiación, ya sea cuando el universo contaba con alrededor de 100.000 años de vida (la llamada época del `desacople' entre la materia no-relativista y la radiación), como así también luego, durante el viaje de los fotones del fondo cósmico hacia nosotros. Sus movimientos rápidos y sus múltiples interacciones producen una red de cuerdas largas y de lazos cuya desintegración podría llenar el universo con un fondo de ondas gravitatorias (cuya detección directa es aún un sueño que en un futuro cercano podría hacerse realidad).



● Interacción entre cuerdas y formación de lazos. Cuando dos segmentos de cuerda cósmica interaccionan, primero sufren una ligera deformación, luego se fusionan en un nudo y finalmente intercambian extremidades (interconmutación). Una acumulación inestable de energía de lo que era el nudo se desintegra rápidamente en forma de una ráfaga de partículas de gran unificación (ilustración (a)). En (b) se muestra la interconmutación de cuerdas conductoras simuladas por P. Laguna y R. Matzner en 1990. Estos autores mostraron que, en ciertos casos, las corrientes de distintas cuerdas pueden converger en el punto de interacción, cancelándose mutuamente, pero generando un crecimiento de la densidad de la carga eléctrica (el ensanchamiento de las cuerdas). En sus simulaciones, este exceso de carga rápidamente se disipa y no altera en gran medida la descripción simple de (a).

Como si toda esta `fenomenología' no fuera ya lo suficientemente interesante en sí misma, existen modelos con buenos fundamentos teóricos donde, en un determinado momento de su evolución, las cuerdas cósmicas desarrollarían tremendas corrientes eléctricas. Estos objetos se comportarían entonces como el análogo astrofísico de alambres conductores y, en particular, podrían explicar algunos de los misterios de la cosmología observacional actual. Por ejemplo, estas corrientes serían clave para la generación de campos magnéticos primordiales a escalas protogalácticas, mientras que el movimiento rotatorio de los portadores de carga eléctrica ayudaría a sostener (por efecto centrífugo) pequeños lazos de cuerdas y contrarrestar así su desintegración radiativa. Así, estos lazos estables podrían sobrevivir hasta nuestros días y constituir una parte de la tan ansiada materia obscura no bariónica, cuya verdadera identidad aún elude a los físicos experimentales.

En lo que sigue, mostraremos varias razones por las cuales se piensa que las cuerdas cósmicas, conductoras o no, existen (claro que, si estuviéramos "realmente" seguros, con "una" buena razón bastaría). Mostraremos, además, los motivos por los cuales ellas po-

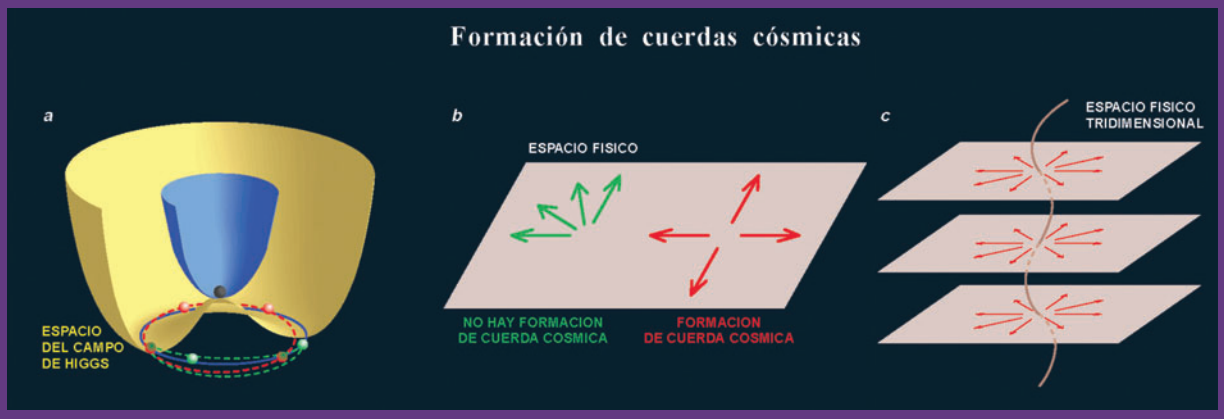
drían resolver algunos misterios cosmológicos así como también llevar a predicciones por demás interesantes y testeables.

Pero, ante todo, expliquemos cómo es que estos objetos hipotéticos podrían haber visto la luz en el pasado de nuestro universo.

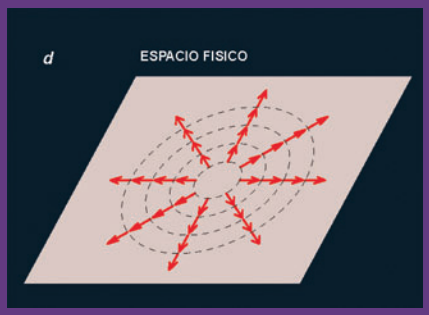
■ Formación de defectos topológicos

Las teorías de gran unificación son modelos de física de partículas que proporcionan el marco matemático en el que, con excepción de la gravedad, todas las otras formas conocidas de interacción emergen como parte de un esquema unificador. En estos modelos, las distintas fuerzas se relacionan en términos de simetría. Un concepto central es el de la 'ruptura' de esta simetría, que dará origen a las leyes físicas como las conocemos hoy. En el curso de la expansión y enfriamiento del universo, primero la interacción gravitatoria y luego todas las demás conocidas, la interacción fuerte, la débil y la electromagnética, habrían ido adoptando sus propias identidades. En el contexto del modelo estándar del Big Bang, la ruptura espontánea de simetrías fundamentales se realiza en forma de transiciones de fase en el universo temprano. Una transición de fase es un cambio abrupto en una o más propiedades físicas de un sistema cuando su temperatura varía en forma continua. Algunos ejemplos, son la transición quark-hadrón (confinamiento), que según la teoría cromodinámica cuántica se habría producido al microsegundo de vida de nuestro universo, y la transición electrodébil, cuando el universo contaba con apenas una parte en 10^{12} de segundo de vida y tenía tan sólo una parte en 10^{15} su tamaño actual.

Son muchas las simetrías que habrían sido rotas con el paso del tiempo. En cada una de estas transiciones, el espacio-tiempo se 'orienta' por la presencia de un hipotético campo de fuerzas, cuya identidad podría ser cualquiera –bajo ciertas condiciones–, pero que muchos físicos creen que se identifica con el llamado "campo de Higgs", y que se extiende por todo el espacio. Esta orientación señala la transición de un estado de alto grado de simetría hacia un estado final donde las leyes físicas del sistema en estudio (el universo, por ejemplo) obedecen a un grupo de simetría menor.



El campo de Higgs evoluciona en un potencial (superficie azul) que representa un estado de alto grado de simetría, centrado en el valor cero del campo. A fin de minimizar su energía, a una temperatura dada el campo tratará de permanecer en la base del potencial. Durante la transición de fase, el universo entero se enfría y este potencial adquiere una forma nueva (superficie amarilla) desarrollando una circunferencia de mínimos equivalentes (en violeta). Nuevamente al querer minimizar su energía el campo de Higgs elegirá espontáneamente un nuevo mínimo (una orientación particular) a lo largo de esta circun ferencia (Gráfico a). Diferentes regiones del universo, sin ninguna vinculación causal, terminarán con orientaciones arbitrarias del campo de Higgs. En ciertas ocasiones, una curva cerrada en el espacio físico intersecará regiones con todas las orientaciones posibles del Higgs (flechas rojas, correspondientes a la línea punteada roja en la Gráfico a). En este caso, una cuerda cósmica atravesará algún punto interior a la curva cerrada. En opción alternativa, las flechas verdes muestran una situación en que ninguna cuerda corta el plano (Gráfico b).
Si ahora extendemos este mecanismo al espacio tridimensional, las regiones del plano cortado por una cuerda pueden superponerse y así reconstruir la localización de ésta. Las estructuras lineales resultantes constituyen las cuerdas cósmicas (Gráfico c).



En un experimento mental podemos contraer la curva de todas las orientaciones posibles del Higgs en el espacio físico. El campo se verá obligado a dar la vuelta más deprisa alrededor de esta curva. En el límite en que la curva se convierte en un punto, el campo no puede ya tomar una dirección determinada, sino que valdrá cero. En cuyo caso, el campo Higgs se localiza en la cima de la joroba central del potencial (superficie amarilla); se ve, pues, forzado a abandonar la circunferencia (violeta) de mínimos. Esta diferencia energética es enorme. Uniendo todos los puntos espaciales donde el Higgs se anula, formamos la cuerda (Gráfico c); se explica así porqué estas cuerdas engendran finas líneas que encierran energías extraordinarias (Gráfico d).

Y entendemos el origen del nombre defectos topológicos. La circunferencia violeta de mínimos de energía no incluye el punto (en el Gráfico a) donde el campo de Higgs se anula a fin de tomar el valor cero en algún punto (como debe hacerlo, de acuerdo con el Gráfico d), el campo Higgs se ve forzado a abandonar este espacio. Por tanto, las propiedades globales o topología de esta circunferencia posibilitan la existencia de la cuerda. De la misma manera, las cuerdas cósmicas estables no pueden tener cabos o extremos libres, ya que todo segmento de longitud finita se contraería debido a la tensión y desaparecería de la red de cuerdas. Las cuerdas cósmicas sólo pueden tener longitudes mucho mayores que el radio de Hubble (ser infinitas) o formar lazos cerrados.

Como analogía consideremos la transición del agua al hielo. La formación de la estructura cristalina del hielo, donde las moléculas se distribuyen en un enrejado bien definido, rompe la simetría que el sistema poseía cuando éste se encontraba en la fase líquida, cuando ninguna dirección particular era privilegiada. De la misma manera, es la orienta-

ción del campo de Higgs la que quiebra el estado simétrico entre partículas y fuerzas.

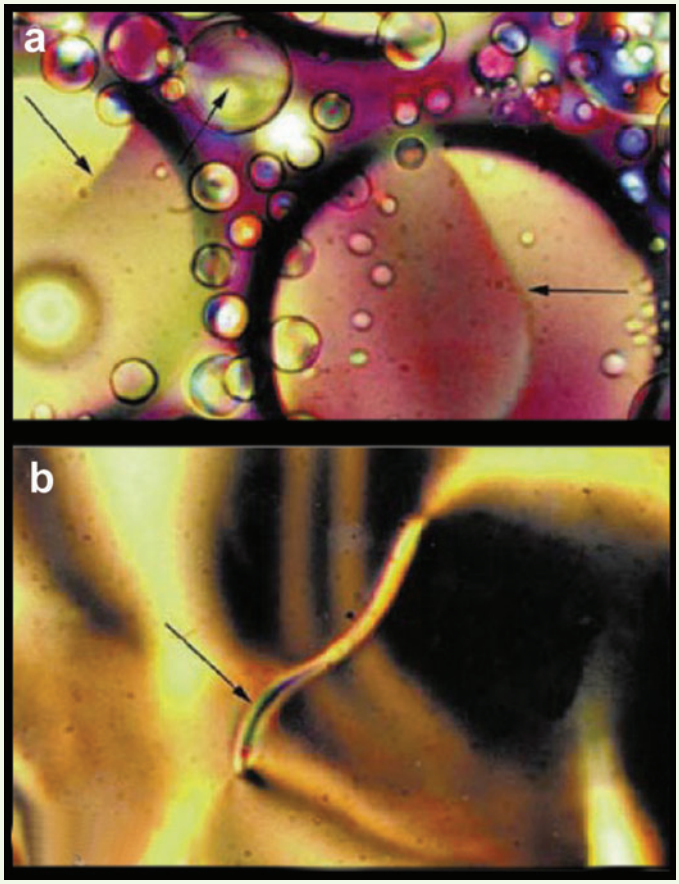
En 1976 Thomas Kibble del Imperial College, Londres, consideró un modelo en el que la transición de fase se producía mediante la formación de "dominios" descorrelacionados, que luego entrarían en coalescencia, dejando a su paso vestigios en forma de defectos. En el universo en expansión existen regiones del espacio suficientemente alejadas, que aún no han tenido tiempo de `comunicarse' entre sí. Se las considera así descorrelacionadas debido a la ausencia de interacción causal.

El campo de Higgs se ve alterado tanto por fluctuaciones cuánticas como térmicas que influyen en su dinámica. Por ello no hay razones para que su comportamiento sea uniforme en el espacio. **Entonces, es natural suponer que en distintas regiones del espacio, el campo de Higgs terminó orientado de distintas maneras y que, cuando estas regiones finalmente se pusieron en contacto, resultó difícil para aquellos dominios de orientación muy distinta lograr ajustarse y encajar suavemente.**

Estos `desperfectos' del campo de Higgs serían ejemplos únicos de increíbles cantidades de energía. Semejantes defectos cósmicos atrapan en su interior el estado físico del universo en las épocas tempranas en que se formaron, en condiciones de energía tan altas que serían imposibles de reproducir en los aceleradores de partículas actuales. Este aspecto atrajo el interés de la comunidad de los cosmólogos.

Más interesante aún es que, a diferencia de otros mecanismos propuestos para la generación de efectos cosmológicos observables, los defectos topológicos pueden ser producidos en el laboratorio. En 1985, Wojciech Zurek del Laboratorio Nacional de Los Álamos propuso usar la transición del He-4 normal a superfluido para poner a prueba el "mecanismo de Kibble". Su idea era que después de un enfriamiento repentino se formarían defectos en todos los rincones del sistema. Se podrían obtener pistas útiles para la cosmología, mediante el estudio de sus propiedades.

Al principio, la transición superfluida del helio resultó un hueso duro de roer: se precisaban temperaturas muy bajas (alrededor de 270 grados bajo cero), además de condiciones de laboratorio extremas. Sin embargo, los investigadores lograron realizar tests similares recurriendo a compuestos orgánicos particulares, llamados cristales líquidos. Se trata de compuestos con fases intermedias entre las fases sólida y líquida. Se les observa fluir como líquidos, pero poseen además propiedades de sólidos cristalinos. Se les puede imaginar como cristales cuyas moléculas, a pesar de haber perdido parte de su orden posicional, han sabido mantener un cierto orden en su orientación. Las moléculas de cristales líquidos "nemáticos" tienen forma de `barra' con longitudes del orden de 20 angstrom (20×10^{-10} metros) y, al presentar una tendencia a organizarse en forma paralela, muestran propiedades ópticas muy útiles (los relojes digitales de los años 80 funcionaban con compuestos nemáticos).



● Nucleación de pequeñas burbujas nemáticas durante la transición de fase, a partir de un compuesto isótropo de cristal líquido, después de disminuir la temperatura (variación de una décima de grado en el intervalo de 20 minutos). Las flechas en la figura superior indican irregularidades propias de las burbujas debido a efectos de frontera (anclaje superficial). Estas irregularidades generan defectos topológicos en el compuesto. La colisión posterior de las burbujas (especialmente de aquellas más pequeñas) dará origen, además, a otros defectos estables, análogos a los defectos topológicos cósmicos. En la figura inferior un ejemplo de defecto (disclinación lineal) aparece sumergido en la fase nemática del cristal líquido. [Esta es una fotografía microscópica con luz polarizada de compuesto mezcla con predominancia de pentilcianobifenilo, cuyo punto de transición de fase isótropo-nemática es del orden de 65 grados centígrados. Imagen cortesía de O.D.Lavrentovich, de la Universidad Estatal de Kent.]

Los cristales líquidos sufren transiciones de fase a temperaturas que varían de 10 a 200 grados centígrados y generan estructuras fácilmente detectables a simple vista o con el microscopio. Después de un periodo transitorio más o menos corto, defectos individuales se irán formando en el sistema. Sin embargo, es importante notar que, si bien existen interesantes analogías entre defectos en cristales y en el universo primordial, también hay ciertas sutilezas a tener en cuenta. En sistemas de materia condensada, la dinámica es no-relativista y dominada por la fricción. Además, no sólo se formarán defectos en los puntos de colisión entre dominios, sino que en el interior mismo de estos dominios (burbujas nemáticas, por ejemplo) ya existen defectos puntuales y líneas de "disclinación", debidas –en gran medida– a efectos de frontera.

Desde hace algunos años, varios grupos han logrado llevar a la práctica la idea original de Zurek. Al realizar una expansión rápida a través de la densidad crítica del He-4 pu-

dieron observar una producción copiosa de vórtices cuantizados (el análogo de las cuerdas cósmicas en física de la materia condensada). Además, en otros experimentos realizados con He-3 en lugar de He-4, se logró medir la densidad de vórtices y así verificar cuantitativamente las predicciones teóricas. Estos diferentes tests (con cristales líquidos y Helio) suministran una especie de "confirmación experimental" de los modelos con defectos topológicos cósmicos, aumentando así la credibilidad en estas ideas. Por último, en el pasado hubo planes para realizar experiencias de laboratorio con producción de vórtices con capacidad de transportar corrientes; éstos serían, entonces, los análogos exactos de las cuerdas cósmicas conductoras.

Originariamente, los modelos cosmológicos con aparición de defectos topológicos asumían que las transiciones de fase relevantes se producirían a temperaturas del orden de 10^{16} GeV (donde GeV es gigaelectronvolt = 10^9 eV y corresponde aproximadamente a 10.000 veces la temperatura del núcleo estelar al inicio de un colapso de supernova). En cosmología se hizo frecuente hablar de temperatura y energía sin hacer casi distinción: en general, se refiere a la energía de movimiento promedio que una partícula dada tendría a esas temperaturas.

Temperaturas de 10^{16} GeV corresponden a energías de gran unificación. Si descendiéramos unos 14 órdenes de magnitud, nos encontraríamos con las energías más altas alcanzadas por los aceleradores de partículas actuales, la escala electrodébil. En todo este rango de energías no hay modelos que sean absolutamente convincentes. Sin embargo, ¿es razonable que nada nuevo haya ocurrido, que nos hallemos simplemente frente a un gran desierto? Muchas teorías sugieren que algún tipo de “física nueva” está allí, apenas por encima de la escala electrodébil. Y ésta es la razón, entre otras, para la construcción, y reciente puesta en funcionamiento, del acelerador de nueva generación LHC (sigla que, como ya lo mencionamos, corresponde a Large Hadron Collider) en el Centro Europeo de Investigaciones Nucleares (CERN), que alcanzará energías de alrededor de 1.000 GeV. Dentro del marco de esta nueva fenomenología, los defectos topológicos podrían evidenciarse, y de este modo llenar el hueco de la manera más simple y observacionalmente verificable.

■ Generación de Corrientes en Cuerdas Cósmicas

Muchos de los comentarios previos se aplican a todo un grupo de defectos topológicos cósmicos relevantes. Estos pueden surgir como resultado de diferentes esquemas de ruptura de simetría y, entonces, dependen del tipo particular de modelo de gran unificación que se considere. Entre estos defectos, se destacan las cuerdas cósmicas, no sólo por no producir perjuicio alguno a la cosmología estándar, sino también porque, si existieron efecti-

vamente en el pasado, ellas podrían ayudar a resolver muchos de los misterios actuales.

Progresos de los últimos años dejaron claro que los defectos topológicos, y las cuerdas en particular, pueden poseer una estructura mucho más rica de lo que en principio hubiéramos imaginado. En modelos unificados genéricos el campo de Higgs, responsable de la existencia de la cuerda, interaccionará con otros campos fundamentales. Esto no debiera sorprendernos, ya que otras teorías de partículas de relativamente baja energía incluyen interacciones entre los campos para generar la masa de partículas livianas (fermiones por ejemplo), como el electrón, y también los bosones W y Z (partículas mediadoras de las interacciones) descubiertos en el CERN en los años 80.

Si alguno de estos campos fundamentales presentes en el modelo se halla cargado eléctricamente, y si en el espacio interior de la cuerda este campo logra "condensarse", el resultado genérico es la presencia de corrientes eléctricas que fluyen a lo largo de su núcleo. Aunque estas cuerdas son las más atractivas, el hecho de contener propiedades electromagnéticas no es fundamental para la cabal comprensión de la dinámica de los lazos (supuestos circulares por simplicidad). En efecto, mientras que en el caso de cuerdas sin cargas ni corrientes, argumentos de simetría nos prohíben distinguir la existencia de rotaciones rígidas alrededor del eje (¿cómo darse cuenta de que un anillo perfecto está o no girando alrededor de su eje de simetría perpendicular al plano del anillo?), la sola presencia de pequeñas corrientes a lo largo del lazo rompe esta simetría y marca una dirección privilegiada que permite la rotación del lazo. Esto también se puede entender como la existencia de soluciones estacionarias de partículas en orbitales cuánticos, donde la inmensa tensión de la cuerda (que tiende a hacer colapsar el lazo) se ve compensada por el momento angular (la “energía” de rotación) de las cargas, y es lo que en 1988 los investigadores Davis y Shellard apodaron "vortones".

Las configuraciones de vortones no emiten radiación. A causa de su forma de lazo, lo que implica condiciones de borde periódicas sobre los campos cargados, no es sorprendente que estas configuraciones estén cuantizadas. Desde lejos, estos vortones aparecen como masas casi puntuales con cargas eléctricas cuantizadas (de hecho, pueden contener más de 100 veces la carga del electrón) y momento angular también cuantizado. En este sentido, se asemejan a las partículas. De allí su nombre (o mejor, la terminación de su nombre: compárese vortón con el nombre de la partícula protón). Sin embargo, son bastante peculiares, ya que su tamaño característico es del orden de su número de cargas electrónicas (del orden de 100) multiplicado por su grosor, lo que resulta ser unos 14 órdenes de magnitud inferior al radio clásico del electrón. La predicción para su masa es obtenida, comúnmente, a partir de los modelos de gran unificación, y así los vortones serían alrededor de 20 órdenes de magnitud más pesados que el electrón.

Ahora bien, ¿cuál es el motivo por el que las cuerdas llegarían a ser conductoras? La física dentro de su núcleo difiere notablemente de la física en el exterior. En particular, la existencia de interacciones entre el Higgs y otros campos fundamentales, como el de

fermiones cargados, permitiría a estos últimos perder su masa en el interior de la cuerda. Así, bastaría muy poca energía para crear pares de estos fermiones (creación de partículas a partir de sólo energía) y, por ser efectivamente sin masa, estos podrían propagarse a la velocidad de la luz a lo largo del núcleo de la cuerda. Estos estados fermiónicos de "energía cero" dotan a la cuerda de corrientes y, en el caso de los lazos, proveen el soporte de momento angular necesario para estabilizarlo y contrarrestar su colapso.

Si ésta fuera la historia completa, nos hallaríamos ante un grave problema, ya que estos vortones, como objetos estables, no se desintegrarían y muy probablemente resultarían excesivamente abundantes para ser compatibles con la cosmología estándar (problema similar al ya mencionado de los monopolos magnéticos). Sin embargo, también podría suceder que, en modelos de física de partículas realistas las corrientes sucumbiesen ante transiciones de fase posteriores y, de esa manera, los vortones podrían, en efecto, disiparse. Otra manera de sacarse de encima (al menos parcialmente) el exceso de estos "defectos" es tener en cuenta las autointeracciones electromagnéticas en el estado macroscópico de la cuerda conductora. El campo electromagnético en la cercanía de la cuerda interactuará con la corriente en la cuerda que lo generó, resultando en una modificación de la ecuación de estado (en la descripción microscópica del estado) de la cuerda. Estas modificaciones alejan la distribución final de vortones de la que hubiera existido en ausencia de interacciones, reduciendo su densidad futura. Para explicar mejor este importante punto, pasemos ahora a estudiar la evolución de lazos de cuerdas cósmicas.

■ El futuro de los lazos de cuerdas cósmicas

Concentrémonos ahora en los lazos, cuya formación resulta de interacciones entre cuerdas largas. Su forma es arbitraria y, como sus progenitores, se moverán a velocidades relativistas y emitirán radiación gravitatoria. Esto hará que los lazos tiendan a contraerse, mientras que las corrientes (la rotación de los portadores de carga), aunque inicialmente débiles, irán afectando lentamente la dinámica del lazo. Además, la enorme tensión de la cuerda tratará de minimizar la curvatura de la configuración lo que resultará en un anillo casi circular y en rotación.

Una vez que el lazo ha alcanzado la forma de un anillo, está aún por verse si logrará convertirse en un vortón (una configuración de equilibrio) o no. El análisis de estabilidad puede realizarse fácilmente gracias a un formalismo desarrollado por Brandon Carter en 1989 y a través de la relación entre la densidad lineal de masa y la tensión de la cuerda. Esta última constituye la ecuación de estado necesaria para la descripción de la cuerda como objeto macroscópico, relación que, para los modelos con mejores fundamentos, resulta ser también conocida.

Este formalismo ya se ha empleado para el estudio de anillos circulares con corrientes eléctricas, incluyendo las contribuciones debidas al campo electromagnético alrededor de la cuerda que ha sido generado por ésta. Se obtiene una descripción completa de la dinámica, en términos de un número limitado de variables: su masa total, su momento angular y el número de cargas de la configuración. En este caso, se puede verificar que las correcciones electromagnéticas en la ecuación de estado macroscópica tienden a reducir el número resultante de vortones. Así, una configuración estable (correspondiente a un acoplamiento electromagnético débil) puede devenir inestable y colapsar si su masa inicial es demasiado grande (en el caso de acoplamiento intermedio). Sin embargo, el colapso será inevitable e independiente de la masa inicial, si el acoplamiento electromagnético resultara ser fuerte.

Podemos, de forma simple, enunciar el llamado "problema del exceso de vortones": si las cuerdas y sus corrientes se formaron en la época de la gran unificación, si esas corrientes son duraderas (a escala cosmológica) y si la distribución de anillos es tal que una fracción no despreciable de ellos logró sobrevivir lo suficiente, entonces, el universo se habría inundado con estos defectos topológicos y colapsado (debido al exceso de materia).

Como es claro que este colapso no sucedió (pues aún estamos aquí), la salida más simple, dados los 14 órdenes de magnitud en energía por debajo de la escala de gran unificación y sobre los cuales contamos con muy poca información, es considerar que las cuerdas hicieron su aparición a temperaturas bastante menores, en momentos más tardíos de la historia del universo. Esto cuenta con el beneficio extra de que las cuerdas podrían explicar el origen de una parte de la materia oscura. También, ellas se podrían constituir en un posible candidato para la generación de los rayos cósmicos de mayor energía de la actualidad (aquellos que recientemente el Observatorio Pierre Auger, ubicado en Mendoza, Argentina, pudo detectar –adelantemos, sin embargo, que las detecciones recientes del observatorio Auger no parecen precisar unos candidatos tan exóticos como los que estamos discutiendo aquí).

Aunque algunos detalles de la evolución de redes de cuerdas de gran unificación son motivo de cierta controversia, para cuerdas de baja energía la situación se va aclarando cada vez más. Estimaciones recientes indican que los vortones podrían sumar hasta un 5% de la masa crítica del universo, si la transición de fase fuera cercana a la escala electrodébil.

■ Efectos gravitatorios de las cuerdas cósmicas

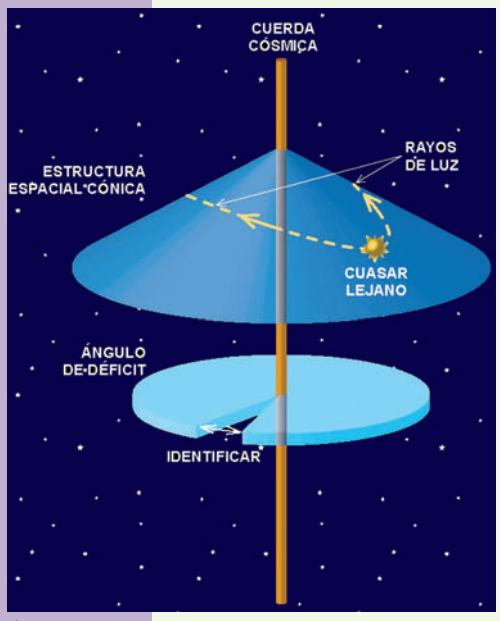
Hasta ahora, las cuerdas cósmicas se nos presentan como construcciones teóricas muy interesantes. Sin embargo, es obvio que si queremos poner en evidencia su existencia en nuestro universo deberemos hallar su “sello” característico. Sólo las cuerdas de gran uni-

ficación son capaces de inducir campos gravitatorios lo suficientemente fuertes como para generar las fluctuaciones de densidad de materia, que luego formarán grandes estructuras astrofísicas e inducirán anisotropías en el fondo cósmico de radiación.

Estas cuerdas tienen un grosor verdaderamente diminuto, no más de 1 parte en 10^{30} de centímetro, mientras que su masa alcanza valores increíblemente altos, del orden de 10^{16} toneladas por centímetro. Sólo por referencia, recordemos que entre los objetos compactos más densos del universo se encuentran las estrellas de neutrones. Estas estrellas tienen una masa similar a la del Sol, pero cuentan con un radio de unos 10 km solamente: su densidad de masa es entonces de alrededor de 10^{9} toneladas por centímetro cúbico. Aunque apretujáramos mil millones de estrellas de neutrones en el tamaño de un electrón, no lograríamos alcanzar la densidad de materia-energía característica de las cuerdas de gran unificación.

Por si estos números no fueran por sí mismos lo suficientemente sorprendentes, digamos que la tensión típica de estas cuerdas es del mismo orden de magnitud que su densidad lineal de masa. Esto hace que las cuerdas oscilen a velocidades relativistas, lo que incrementa la probabilidad de autointeracciones y, por ende, la producción de lazos. Además, estos movimientos permitirán la formación de regiones localizadas de alta energía ("plegamientos" puntiagudos a lo largo de las cuerdas, comúnmente apodados "cusps"), de donde la emisión de las partículas portadoras de carga interiores se vería favorecida.

Por otra parte, el efecto de lente gravitatoria sirve hoy en día como herramienta para diagnosticar la distribución de masa en el universo, ya sea la masa ordinaria (luminosa) o la oscura. Consideremos las propiedades gravitatorias de una cuerda cósmica, que idealizamos como perfectamente recta. De acuerdo con la Relatividad General la presencia de materia-energía curva el espacio-tiempo en sus alrededores, y este tejido espacio-temporal a su vez reaccionará de manera de modificar el desplazamiento y trayectorias de partículas, todo esto de la forma elegante y no trivial como lo indican las ecuaciones de Einstein. En el caso de nuestra cuerda recta particular es suficiente considerar la forma en que se modifica el espacio que la rodea.



● Un espacio cónico: la presencia de una cuerda cósmica modifica radicalmente el espacio que la rodea. Las superficies espaciales ortogonales a la cuerda se construyen extirpándole al plano un pequeño ángulo de déficit (10^{-5} radianes), y luego uniendo los bordes libres (formando superficies cónicas). Tanto las partículas ordinarias como los fotones verán a sus geodésicas sufrir una deflexión en proximidades de la cuerda. Este efecto podría estar detrás de las imágenes dobles de cuásares y de la formación de "estelas" de alta densidad de materia formadas al paso de una cuerda en movimiento.

En efecto, la presencia de la cuerda hace que el espacio que la rodea posea todas las características euclidianas usuales, pero con la forma global de un cono. Un observador masivo que viaja alrededor de la cuerda no logrará percibir curvatura alguna y, por ende, no sentirá atracción gravitatoria. Sin embargo, al mirar hacia el espacio distante, nuestro cuidadoso observador verá repetirse las estrellas, no luego de una revolución completa de 360 grados alrededor de la cuerda, sino luego de un ángulo ligeramente menor. Este ángulo (llamado ángulo de déficit) es realmente pequeño, no mayor que unos pocos segundos de arco en el caso de cuerdas de gran unificación.

Todo tipo de partículas como fotones, átomos y polvo interestelar, si pasara cerca de la cuerda, sufriría una desviación de sus direcciones iniciales del orden de este ángulo de déficit. Este efecto peculiar es una de las primeras herramientas que nos permitirían detectar las cuerdas cósmicas: un segmento de cuerda que pasara entre nosotros y una fuente de radiación suficientemente lejana, un cuasar por ejemplo, dividiría los rayos de luz y formaría una imagen doble. Este efecto es independiente del parámetro de impacto (distancia entre los rayos y el deflector) y, entonces, sería distinto del producido por otros objetos (como agujeros negros, estrellas de neutrones o galaxias) en que las imágenes no sufrirían intensificación relativa.

La misma desviación, esta vez de la trayectoria de la materia ordinaria, nos ofrece una forma interesante de entender la generación de estructuras a gran escala. En efecto, si una distribución dada de polvo interestelar fuera atravesada por una cuerda cósmica, grupos de partículas en lados opuestos de la trayectoria de la cuerda serían (después del paso de ésta) efectivamente empujados el uno hacia el otro, con una velocidad relativa de varios kilómetros por segundo. Así, a lo largo del camino recorrido por la cuerda iría quedando una "estela" de materia de alta densidad, la cual, después de comprimirse por autogravitación, podría dar lugar a distribuciones planas de galaxias como se han observado, no hace mucho, en los censos de estructuras a grandes escalas astrofísicas del universo.

Esta descripción simple se ve ligeramente complicada cuando reconocemos que las cuerdas no son exactamente rectas. Podemos, sin embargo, pensarlas como una sucesión de segmentos rectos, entonces nuestro modelo se aplica sin problemas. Otra complicación adicional de las cuerdas realistas es la existencia de una estructura microscópica (apodada "wiggles" en inglés) que, cuando se la mira con un microscopio, les hace tomar formas irregulares y no ya perfectas y rectas como lo supusimos anteriormente. Por último, la presencia de corrientes disminuirá la tensión mecánica efectiva de la cuerda y la hará diferir de su densidad lineal de masa. En este último caso, la forma cónica del espacio que rodea a la cuerda se verá muy ligeramente modificada y, dado lo diminuto del ángulo de déficit, este efecto está mas allá de nuestra capacidad actual de detección.

La diferencia entre la tensión y la densidad lineal de masa, ya sea por la presencia de corrientes eléctricas o por los wiggles, aumenta las posibilidades de que estas cuerdas generen estructuras astrofísicas. En efecto, estas cuerdas más realistas no sólo poseerán un

ángulo de déficit (que hará converger las trayectorias de las partículas), sino que además ejercerán atracción gravitatoria sobre las partículas masivas a su alrededor. De ahí que las cuerdas podrían estar en la raíz no sólo de la formación de distribuciones planas de estructura, sino también (gracias a su poder de acreción de la materia circundante) de largas distribuciones filamentosas.

Acabamos de ver que las cuerdas cósmicas pueden dar cuenta de una gran variedad de fenómenos astrofísicos. Sin embargo, estos no son únicos de las cuerdas; otros mecanismos (más convencionales) tratan de explicar el efecto de lente gravitatoria, la formación de grandes estructuras, la existencia de materia oscura, etc. El futuro decidirá si las cuerdas permanecerán como candidatos interesantes, aunque exóticos, para responder a muchos de estos interrogantes que nos plantea la Naturaleza.

■ Astrofísica con cuerdas conductoras

Es un hecho observacional que existen campos magnéticos en las galaxias y, en particular, en nuestra propia Vía Láctea. Una forma de explicar su presencia es invocar la evolución turbulenta de diminutos campos "semilla" que fluctúan aleatoriamente. Esto conduciría a campos a gran escala a través de efectos magnetohidrodinámicos, en los cuales la longitud de coherencia (es decir, la talla típica) del campo magnético se incrementaría en varios órdenes de magnitud. En el proceso de formación de estructuras astrofísicas, el flujo del campo magnético permanece aproximadamente constante y la amplitud del campo aumenta durante la compresión gravitatoria en una protogalaxia. Además, la rotación del sistema galáctico es capaz de aumentar la fuerza del campo hasta los 10^{-6} gauss observados actualmente a través de un efecto llamado de dínamo.

Sin embargo, el mecanismo magnetohidrodinamico arriba mencionado es extremadamente delicado, y en la actualidad no hay consenso general sobre el hecho de que éste sea capaz de aumentar lo suficiente la longitud de coherencia del campo. ¿Como conseguir entonces generar un campo magnético que, aunque pequeño, posea la longitud de coherencia suficiente como para ajustarse a los campos galácticos que observamos en la actualidad?

Las cuerdas cósmicas conductoras transportan corrientes eléctricas de enorme intensidad. En 1985, Edward Witten de Princeton estimó la corriente máxima proporcional a la masa del portador fermionico de cargas en la cuerda. En el caso de tratarse de un electrón, esta corriente rondaría las decenas de amperios, lo cual no es muy espectacular. Sin embargo, en el caso de que se tratase de partículas de gran unificación, se podrían alcanzar corrientes de hasta 10^{20} amperios, lo que es enorme, incluso para los estándares astrofísicos.

Para producir campos magnéticos precisamos objetos cargados eléctricamente, mo-

viéndose por el espacio; pues bien, esto es exactamente lo que las cuerdas conductoras son y hacen. Cálculos actuales en modelos de cuerdas cósmicas conductoras estiman los valores de los campos magnéticos generados del orden de 10^{-20} gauss a escalas protogalácticas de 100 kiloparsecs. El efecto dínamo aumentaría luego la intensidad del campo hasta los valores observados hoy.

Pasemos ahora a otro problema astrofísico que podría tener relación con las cuerdas conductoras: el problema de los rayos cósmicos. La atmósfera terrestre está constantemente bombardeada por una multitud de partículas, como fotones, electrones, protones y núcleos pesados, que se conocen genéricamente como "rayos cósmicos" y que provienen del espacio exterior. Detecciones recientes lograron registrar eventos de este tipo con energías asombrosamente altas, del orden de cientos de exa-electronvolt (exa = 10^{18}), lo que corresponde aproximadamente a la energía cinética de una pelota de tenis con una velocidad de 150 km/h (y toda esta energía concentrada en una partícula atómica).

Ahora bien, lejos de estar vacío, el espacio intergaláctico se halla ocupado por fondos cósmicos de radiación electromagnética (tales como el fondo de ondas radio y el de microondas), los cuales, para estos rayos cósmicos de tan alta energía deben parecerse a un puñado de fotones altamente energéticos y lesionadores. Es así que por encima de una velocidad crítica, una partícula cualquiera vería su energía degradada a través de interacciones con estos fotones. Por ejemplo, los protones que alcanzarán nuestra atmósfera con la energía necesaria para explicar estos eventos energéticos mencionados arriba no lograrían sobrevivir en un recorrido superior a 30 megaparsecs. Este es el límite (llamado GZK) de Greisen-Zatsepin-Kuzmin.

La primera explicación que se podría intentar es ver si los orígenes de estos rayos cósmicos se hallan cerca (en el sentido astrofísico) de nuestra galaxia. Ahora bien, hasta fuentes inusuales como cuásares o galaxias activas se encuentran demasiado lejos. Es por ello que eventos de tales energías constituyen actualmente un misterio, ya que cuando se mira en la dirección de la cual provienen (a tales energías, la desviación de su trayectoria es pequeña) no se encuentra nada cerca que pudiera haberles dado el puntapié inicial. ¿Cuál es la identidad de estos rayos cósmicos tan energéticos, y cómo se las arreglan para llegar hasta nosotros?

Por el momento, la astrofísica estándar parece ser incapaz de responder a estos interrogantes y, en esencia, afirma que no deberíamos recibir estos rayos cósmicos. Es aquí donde los defectos topológicos, y en particular las cuerdas conductoras, entran en escena. Ellas poseen dos formas de enviarnos partículas súper energéticas. La primera es por emisión de partículas de gran unificación a energías tremendas (por ejemplo, a partir de los cusps de las cuerdas), por lo cual no precisan ser aceleradas. La segunda posibilidad es más interesante aún, y es que quienes golpean nuestra atmósfera podrían ser lazos estables de cuerdas conductoras, que serían confundidas con partículas ordinarias.

Ambas posibilidades son muy atractivas ya que, si se verifican, podrían ofrecernos in-

formación (indirecta) sobre épocas tempranas de nuestro universo, inaccesibles de otra manera. Siendo optimistas, esta situación podrá ser aclarada (eventualmente desechada) dentro de algunos años con más datos, como los que viene recabando el observatorio Pierre Auger (bautizado en honor al físico francés que estuviera entre los primeros en estudiar los rayos cósmicos en la década de 1950). En estos tiempos, el Auger ya ha recolectado y analizado toneladas de datos. Sin embargo, por ahora los resultados no muestran indicios de que los defectos topológicos estén detrás de los eventos tan energéticos que se han detectado.

Expliquemos cómo funcionan estos dos mecanismos de producción de rayos cósmicos. Las cuerdas conductoras transportan corrientes que pueden ser interpretadas como partículas atrapadas en su interior. Estas últimas son increíblemente masivas (comparadas con los electrones y protones) e inestables. Sin embargo, como los neutrones, que son perfectamente estables dentro de un núcleo, pero se desintegran en unos pocos minutos fuera de él, estas partículas pesadas exhiben un comportamiento similar cuando se hallan repentinamente expulsadas fuera de una cuerda. Es decir, fuera del núcleo de las cuerdas las partículas que originan las corrientes resultan inestables y se desintegran.

Los defectos topológicos (como las cuerdas cósmicas) serían los únicos objetos astrofísicos capaces de conservar estas partículas hasta el día de hoy. Ningún otro mecanismo es capaz de fabricarlas en la actualidad. Sólo aquellas atrapadas en las cuerdas habrían quedado en vida.

En su evolución, las cuerdas cósmicas sufren eventos violentos: a veces se pliegan enormemente, formando cusps, otras veces se entrecruzan e intercambian extremidades (interconmutación). En cualquiera de estos eventos, algunas partículas atrapadas en la cuerda logran escapar y, una vez en el exterior, se desintegran. Pero, como ya explicamos, estas partículas son mucho más masivas que cualquier otra actual. Así, de acuerdo a la famosa ecuación de Einstein $E=mc^2$, las partículas en las que se desintegran son extremadamente energéticas.

Veamos ahora la segunda posibilidad. Es que quizás exista una gran población de cuerdas con energías no tan elevadas. En este caso, lazos diminutos de relativamente baja energía, como los vortones, podrían haber sobrevivido hasta hoy y, como vimos antes, su número podría constituir un porcentaje importante de la masa crítica del universo. Vimos también que los vortones pueden contener algo más de 100 veces la carga eléctrica del electrón, y por eso serían más fácilmente acelerados a lo largo de las líneas de campo eléctrico en los núcleos galácticos activos. Su enorme masa hace que se precisen velocidades mucho menores (comparadas con la de los protones) para alcanzar energías equivalentes. Vemos que, como un 'extra', los vortones podrían viajar enormes distancias sin ser alterados por el limite GZK.

Entonces, resultaría suficiente que un vortón colisionara con una molécula cualquiera de la atmósfera terrestre para desintegrarse y ser visto como si fuera una partícula muy

energética. Además, la interacción de los portadores de carga en el interior del vortón y los quarks (confinados en protones atmosféricos) generaría una señal muy característica en los detectores. Se estima en aproximadamente una parte en 10^5 la probabilidad de que un vortón interaccione con la atmosfera y, por ello, de ser efectivamente vortones los rayos cósmicos de ultra alta energía, se esperarían importantes cadenas horizontales de eventos, bien adecuadas para la red de detectores de la gran extensión del observatorio Auger. Reiteremos nuevamente, sin embargo, que estas especulaciones no han sido aún verificadas (y quizás jamás lo sean).

El gran colisionador de hadrones LHC

El acelerador de protones, cuya puesta en funcionamiento en septiembre de 2008 atrajo la atención de la prensa mundial, fue diseñado para producir colisiones de haces de esas partículas subatómicas haciéndolas desplazarse en sentidos opuestos –con energías cinéticas mayores que las generadas hasta la fecha con máquinas del mismo tipo– por un túnel circular de 27km de largo situado 100 metros por debajo de la superficie de la Tierra en las afueras de Ginebra. Nos podríamos preguntar: ¿para qué?

La respuesta sencilla, casi simplista, a esta pregunta –sobre todo considerando que el costo de construir y operar la máquina para hacer los experimentos se mide en miles de millones de dólares– se puede sintetizar en otra pregunta, que los experimentos de Ginebra procuran responder: ¿de qué está compuesto y cómo cambia el mundo material del que somos parte? Esta pregunta se formula tanto acerca del universo entero, como de sus componentes más pequeños, es decir, de las partículas que forman los átomos (los cuales, a su vez, constituyen las moléculas y, éstas, todas las cosas materiales, incluso los seres vivientes). He aquí lo que se busca saber haciendo los experimentos que ha comenzado a realizar la máquina, sobre los que, sin duda, oiremos hablar mucho en el futuro cercano.

El mundo científico piensa que el universo se halla en continua expansión. Como vimos, llegamos a esta convicción mediante el análisis de varios fenómenos físicos, entre ellos, las características de la luz y de otras radiaciones que llegan a la Tierra desde el espacio, por ejemplo, de estrellas y galaxias. También concluimos que, al expandirse, el universo se enfría, como lo hacen los gases en la Tierra. En otras palabras, considerando la realidad en una escala cosmológica, podemos deducir que las galaxias lejanas se dis-

tancian unas de otras cada vez más y que el espacio entre ellas, inundado por radiación de diferentes longitudes de onda, se va enfriando lentamente con el transcurso del tiempo.

Ante estas constataciones y deducciones, llegamos a la conclusión de que, si miramos hacia atrás en el tiempo cósmico en lugar de hacerlo hacia adelante, en vez de encontrarnos con un universo cada vez más frío y disperso, tendremos uno cada vez más caliente y concentrado. Y llegaremos en algún momento a una situación física de increíble concentración, con densidades y temperaturas jamás imaginadas para el pasado remoto de nuestro universo, a partir de las cuales el cosmos evolucionó y se expandió hasta llegar a ser lo que es hoy. Como lo señalamos antes, los científicos llaman a este proceso evolutivo, el modelo de la gran explosión. Se refieren a él como el modelo del Big Bang, expresión que inventó en tono despectivo el astrónomo inglés Fred Hoyle para referirse a la teoría que acabamos de sintetizar, que Hoyle rechazaba, y que comenzó a formular hacia 1930 en lenguaje matemático el astrónomo y abate belga Georges Lemaître, de la Universidad de Lovaina.

Si, como una forma de conocer la índole del mundo material al que pertenecemos, nos interrogáramos sobre cómo habrá sido el universo que emergió de semejante estado embrionario, nos encontraríamos explorando los estados de la materia a temperaturas y densidades extremadamente altas. Si bien no nos podemos trasladar hacia el pasado para constatar cómo eran las cosas entonces, podemos hacerlo con la imaginación y aplicar las leyes de la física para determinar las características del universo de otros tiempos.

Al elevarse la temperatura, los corpúsculos de materia que forman todas las cosas –lo que nos rodea y también los cuerpos celestes– comienzan a disgregarse y se separan en sus átomos más simples. Al mismo tiempo, el fondo de radiación que inunda el espacio entre las galaxias se calienta. Los corpúsculos de radiación, o fotones, adquieren energía y dejan de ser inofensivos para la materia. Cuando, en ese hipotético viaje hacia el pasado cósmico, el universo alcanza una temperatura de unos pocos miles de grados, comparable a la que hoy reina en la atmósfera del Sol, los átomos ya no pueden sobrevivir el bombardeo de los fotones y se dividen en sus componentes más simples: en núcleos atómicos con carga eléctrica positiva y electrones con carga eléctrica negativa.

Nos encontramos así con un universo que podemos imaginar como una suerte de sopa incandescente de fotones, electrones libres y núcleos atómicos, estos últimos constituidos, a su vez, por protones y neutrones. Tanto protones como neutrones son partículas subatómicas relativamente pesadas, si se las compara con los electrones; por ello se las agrupa genéricamente bajo el nombre de hadrones (la raíz griega *hadros* significa, precisamente, robusto o pesado).

Si continuamos nuestro viaje hacia el pasado, el continuo aumento de temperatura y densidad nos lleva a un estado en el cual ni siquiera los núcleos atómicos pueden subsistir. Estamos, ahora, en un universo cuya temperatura alcanza unos mil millones de grados, en el que los núcleos de los átomos simplemente se deshacen. Las fuerzas que los man-

tienen unidos procuran impedir la disgregación de los protones y neutrones que los integran, pero la temperatura es tan alta que el continuo choque de fotones contra ellos los deshace.

Pero los hadrones (es decir, protones y neutrones) no son partículas simples o elementales. Están formados por partículas más simples que ellos, los quarks. Hacen falta tres quarks para conformar un protón o un neutrón (en distinta combinación en cada uno). ¿Son los quarks los componentes más elementales de la materia, los que no se pueden dividir? No lo sabemos en estos momentos, pero los científicos, especialmente aquellos que trabajan en la física de las partículas elementales, quieren averiguarlo.

Por encima de un millón de millones de grados (10^{12}), en la llamada era hadrónica, los protones y neutrones se desarman y, en su lugar, quedan tan sólo los quarks y sus interacciones, acompañados de electrones y otras partículas livianas, además de un mar incandescente de radiación que los inunda.

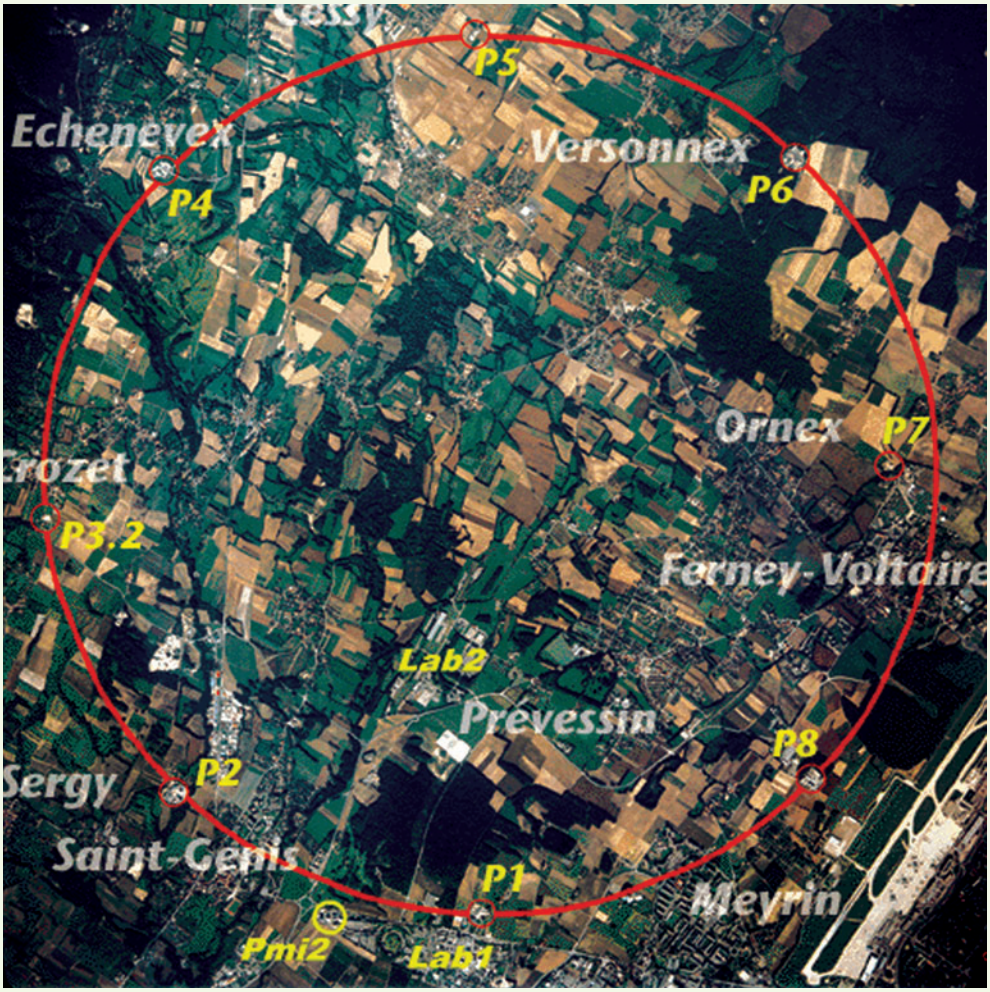
Los modernos aceleradores de partículas –y aquí llegamos a la máquina ginebrina que motiva esta sección– permiten recrear determinadas condiciones que imperaron en esos tempranos instantes de nuestro universo. Alternativamente, siempre podríamos tratar de detectar procesos astrofísicos que se produzcan en zonas particularmente calientes del universo observable, como los núcleos de algunas galaxias activas. Pero, en ese caso, seríamos meramente observadores afortunados, y no tendríamos forma de realizar un experimento en condiciones controladas.

En síntesis, un acelerador de partículas permite recrear en condiciones controladas de laboratorio algunas características del universo en épocas arbitrariamente elegidas del pasado, incluso en tiempos tan primigenios que nada de lo que hoy nos rodea podía existir. En cierto sentido, ese universo primigenio era mucho más simple que el de hoy: consistía de algunas pocas partículas elementales y algunas interacciones entre ellas, todo regido por un puñado de leyes físicas y simetrías básicas de la naturaleza (que aun quedan por revelar).

La eficacia con que un acelerador puede realizar su tarea sólo depende de la inteligencia de los científicos que diseñen los experimentos, de los ingenieros que construyen la máquina para llevarlos a cabo y de los políticos que asignen los presupuestos para financiarlos.

El acelerador puesto en funcionamiento en Ginebra se llama gran colisionador de hadrones y es conocido por la sigla LHC (de Large Hadron Collider). Está ubicado en la Organización Europea de Investigaciones Nucleares, conocida por la sigla CERN, que deriva de su antiguo nombre Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. Es el acelerador de partículas más grande, tecnológicamente más avanzado y más costoso que se haya construido hasta el momento.

Su diseño, construcción y puesta a punto requirieron años de trabajo de miles de personas de varias decenas de nacionalidades (incluida la argentina). Fue puesto oficialmente



en funcionamiento el 10 de septiembre de 2008, cuando un haz de protones comenzó a circular en el interior de su circuito cerrado, un anillo de 27 km de recorrido, que se halla bajo tierra en la frontera entre Francia y Suiza. Problemas técnicos obligaron a postergar los experimentos prácticamente a los pocos días de comenzados. Al momento de escribir estas líneas, el LHC se halla en etapa de pruebas, pero la comunidad de científicos, seguramente, logrará sortear todos los problemas que se presenten hasta hacerlo trabajar como todos esperan.

El LHC permitirá recrear ciertas condiciones físicas del universo cuando su edad era de una millonésima de millonésima de segundo. Eso significa esclarecer las características del universo embrionario muy cerca de lo que hoy se conoce como la singularidad (hipotético evento espaciotemporal donde las leyes actuales de la física ya no sirven), pero no quiere decir determinar el origen del universo. Ni siquiera permite hablar en términos

● Comparación entre el Anello di Nardò (un autódromo ubicado en el nivel del mar y a pocos kilómetros de este, en la Puglia italiana, sobre el golfo de Taranto) y el anillo del gran colisionador de hadrones (construido a unos 100 metros debajo de la superficie de la tierra en la frontera suizo-francesa). Para acelerar autos a 500 km/h en un circuito de pequeñas dimensiones se precisa de un anillo de unos 2 km de radio. Acelerar protones a velocidades próximas a la de la luz requiere de un anillo no mucho mayor: con el doble de radio alcanza.

científicos de origen del universo, ni afirmar o negar sobre bases científicas que haya habido tal origen. Es claro, entonces, que la noción de crear un universo en el laboratorio –o recrear el supuesto origen del cosmos que conocemos– como fue reiteradamente escrito y anunciado en los medios, carece de fundamento.

Las expectativas de los científicos están a la altura de la envergadura del gigantesco acelerador, que hará colisionar haces de protones con energías cinéticas jamás logradas antes en un laboratorio. Como consecuencia de esos choques, se generará una lluvia de partículas menores dotadas de energía extremadamente alta. Entre esas partículas quizá se encuentren algunas desconocidas o nunca encontradas; por ejemplo, la muy buscada partícula de Higgs (asociada al campo de Higgs que mencionamos en capítulos anteriores), así llamada por Peter Higgs, un físico de la Universidad de Edimburgo que postuló su existencia. Es una de las partículas previstas por el modelo matemático teórico que busca explicar el funcionamiento del mundo subatómico, pero de cuya existencia nunca se tuvo evidencia empírica o experimental.

El mencionado modelo se denomina modelo estándar de la física de las partículas

elementales. Describe con gran precisión y sutil elegancia matemática todas las partículas que componen la materia y las interacciones conocidas entre ellas. El grado de acuerdo existente entre la teoría, las observaciones y las mediciones hechas en los experimentos es único en toda la física. La teoría predice cómo determinadas partículas adquirieron su masa, una propiedad que las diferencia de los corpúsculos de luz, los fotones, para los que ella indica (y la experiencia actual ratifica) que son no masivos. Pero hay dos discrepancias entre el modelo estándar y las observaciones empíricas del mundo: una es la fuerza de gravedad, que el modelo no incluye; la otra es la partícula de Higgs, que se prevé en el modelo, pero las mediciones y experimentos no la han encontrado.

Confirmar experimentalmente la existencia del campo de Higgs (y de su partícula asociada) es esencial para la supervivencia del modelo estándar en su forma actual. Este postula que toda partícula tiene un campo asociado (los científicos hablan indistintamente de campos o de partículas). Así, con el fotón está asociado el campo electromagnético. El modelo estándar establece que muchas de las partículas hoy conocidas interactúan con el campo de Higgs. Las que lo hacen adquieren masa, mayor o menor según su particular modo de interacción. Las que no lo hacen permanecen sin masa. Tal es el caso de los fotones.

El campo de Higgs puede imaginarse como un medio que todo lo impregna, provisto de cierta viscosidad que dificulta el movimiento de las partículas que lo atraviesan. La inercia o resistencia al desplazamiento que deben vencer puede verse como una suerte de masa inercial, lo que explica el surgimiento de la masa de las partículas. Pero sin el campo de Higgs, no habría masa, por lo que encontrarlo a cualquier costo es poco menos que imprescindible.

A partir de los resultados de los experimentos realizados con el LHC, que, por su cantidad demandarán años en su análisis, es posible que surjan partículas desconocidas hasta hoy, que expliquen fenómenos aún inexplicados, como la llamada materia oscura que abunda en el universo; o que se descubran nuevas interacciones, como la llamada supersimetría. Además, y si la larga historia de la experimentación en física sirve de guía, estamos seguros, o por lo menos esperanzados, de que también habrá descubrimientos inesperados. Estos suelen ser los más interesantes.

Volvamos ahora al inicio de esta sección. ¿Para qué se invierten tanto dinero y esfuerzo en intentar responder a las preguntas que tanto desvelan a los físicos? Las respuestas son dos, a las que se les asigna distinta importancia, según sea quien responde. La primera es: porque desde que hay seres humanos en la Tierra, ellos se afanan por conocerse a sí mismos y la índole y las características del mundo que habitan. Milenios de historia sólo han reforzado ese afán. La segunda es: porque toda la tecnología creada por la humanidad, antigua y moderna, sólo fue posible por haber adquirido conocimiento básico del mundo material o la naturaleza. En el mundo actual, el avance tecnológico requiere la continua ampliación y profundización de ese conocimiento básico. Así de sencillo.

El large Hadron Collider o LHC (gran colisionador de hadrones)

¿Para qué se emplea? Para hacer chocar entre sí haces de protones que marchan en sentidos opuestos y así generar inmensos volúmenes de otras partículas de alta energía y alta temperatura. Con ello se explora la física de los tiempos muy tempranos del universo. Particularmente, se busca una partícula elemental llamada técnicamente bosón de Higgs que, dentro del modelo estándar de la física subatómica, otorga masa a las demás partículas. Por eso, alguien tuvo la ocurrencia de llamarla la partícula de Dios y, por extensión, se habló de la máquina de Dios, sin que se trate en ambos casos de otra cosa que una fantasía.

¿Es el acelerador más grande construido? Es el acelerador que realiza colisiones de partículas con más energía. El que le sigue, el Tevatrón del Fermilab en los Estados Unidos, alcanza un poco menos de un tercio de la energía del LHC.

¿Por qué es un circuito cerrado? Por la tecnología actual. Hacer un recorrido lineal requeriría varias veces los 27 km que tiene el circuito cerrado, resultaría muy caro y sería inestable. En un acelerador de circuito cerrado se puede dar más empuje a las partículas sin tener que extender la longitud de su recorrido. El límite es la capacidad de hacer girar una partícula cargada a la que se entregó mucha energía. Se necesitan campos magnéticos muy intensos y los que usa el LHC son los más altos alcanzados con la tecnología actual. Una razón más prosaica es que el túnel ya existía desde hace años, y se construyó el mejor acelerador compatible con lo que ya estaba.

¿Hay peligro en explorar las cosas nuevas que se ensayarán? No se advierte que lo pueda haber. El universo hace constantemente lo que hará el acelerador y no se han visto consecuencias catastróficas. Los rayos cósmicos que llegan a la Tierra y chocan con la materia de la atmósfera superior traen energías mayores, en algunos casos enormemente mayores. La diferencia es que en el acelerador se puede controlar el experimento y analizar con detalle lo producido.

Algunas preguntas y respuestas sobre temas varios de cosmología

A continuación, sigue una pregunta formulada por una persona (de quien ocultamos su verdadera identidad) y una respuesta a sus inquietudes. Este intercambio "epistolar" sucedió realmente (en los inicios de septiembre de 2003) y fue por correo electrónico.

Pregunta

He seguido casi todos los programas de astronomía por televisión, y me parecen fabulosos no sólo por lo actualizados sino por la forma en la cual explican las cosas. Sin embargo, no me quedan claros algunos puntos en lo que se refiere al BIG BANG, y quisiera compartir estas dudas con usted, para ver si puede darme alguna explicación que me ayude a razonar.

Esto se debe a que según esta teoría, el universo (que conocemos) tiene entre 15 y 20 mil millones de años, pero: según los telescopios que han observado los sectores más alejados de nuestro universo, a unos 13 mil millones de años luz se han detectado Galaxias, y esto me extraña bastante.

En primer término, porque si estos telescopios pueden ver tan lejos, deberían poder ver LA NADA, o sea, lugares del cosmos en los que no existan galaxias, estrellas, ni nada, porque si no nos encontramos en el lugar donde se produjo el BIG BANG, el límite de ocupación del espacio alrededor de éste, debería ser de un radio de 15 a 20 mil millones años luz (como máximo entendiendo que las galaxias han viajado a la velocidad de la luz desde el comienzo del tiempo), y nuestros telescopios deberían poder alcanzar fuera de ese radio.

En segundo término, creo que las galaxias no se desplazan a la velocidad de la luz

(CREO), por lo tanto, con más razón deberíamos poder ver los límites del universo del BIG BANG.
Por otro lado, se han llegado a observar galaxias a 13 mil millones de años luz, (según nuestra observación) pero que, si las galaxias poseen un movimiento de expansión dado por el BIG BANG, y además entendemos que la luz de esas galaxias tardó 13 mil millones de años en llegar hasta nosotros, seguramente que en este momento se encuentran mucho mas lejos.
Por lo tanto, hacia algún lugar del espacio deberíamos poder ver el límite del universo, a menos que nos encontremos en el lugar donde se produjo el BIG BANG, ya que la galaxia o estrella más alejada de éste, no podría encontrarse a más de 20 mil millones de años luz de distancia del mismísimo lugar donde se produjo, a menos que hubiera viajado a una velocidad mayor a la de la luz, lo cual según Albert Einstein es imposible, y más aún cuando se trata de grandes distancias.
La otra duda que me inquieta, es la provocada por el vaticinio de que la galaxia de ANDRÓMEDA llegará a chocar con nuestra VÍA LÁCTEA en el futuro, y esto es bastante extraño, si es que el movimiento que poseen las galaxias proviene del BIG BANG, ya que si las dos galaxias provienen de una misma explosión, (situación que lógicamente también les otorga un mismo punto de partida) deberían tener trayectorias que jamás se toquen, como las esquirlas de una granada.
Desde ya muchas gracias por leer estas líneas, y le agradecería mucho más si me contestara algo que arroje un poco de luz a mis interrogantes

Respuesta

Estimado Sr./Sra. XX,

El hecho de que ciertas observaciones recientes encuentren galaxias a distancias nunca antes imaginadas (por ejemplo, a 13 mil millones de años-luz) no es algo que vaya completamente en contra del modelo del Big Bang. Las últimas estimaciones del satélite WMAP (que estudia la radiación cósmica del fondo de microondas) indican que muy probablemente debió existir "algo" que, ya cuando el universo tenía unos 200 millones de años, logró inyectar la energía suficiente en el universo (en forma de radiación UV) de manera tal de hacer que la materia difusa que separaba esos "algos" deviniera ionizada (esto es, los elementos químicos más livianos, como el H, el He, etc, perdieran sus electrones más exteriores). Esos "algos", se estima, debieron ser las primeras estrellas del cosmos (quizás las tan buscadas estrellas de población III (o Pop III) que, al comenzar a "cocinar" los elementos más livianos que las formaban,

para generar elementos más pesados, el producto de la fusión nuclear irradió el medio interestelar con radiación ultravioleta (que ionizó este medio y que, por lo tanto, explicaría las observaciones de WMAP).

Ver la nada. Si el universo es homogéneo como hoy pensamos que lo es (y ningún lugar es privilegiado), pues bien, no deberíamos llegar a ver esas regiones donde "no hay nada". En particular, existe una barrera que limita nuestra visión hacia el pasado y esta barrera hoy, se estima, vale alrededor de unos 300.000 años. Esta época del universo corresponde al momento en que la materia neutra comenzó a formarse (a partir de la sopa cósmica que dominaba el universo antes). La luz que nos llega es una forma de radiación. Esta radiación no podía viajar libremente antes de estos 300.000 años ya que chocaba constantemente con los iones de los elementos más livianos que más tarde atraparían electrones para formar la materia neutra. Luego, nos está vedado el acceso a tiempos más tempranos que esos, sencillamente porque los fotones de la radiación no apuntan a la fuente que los emitió (y más aún, en esas épocas aún no había fuentes para emitirlos...)

¿Qué esperaría ver yo si se me ofreciera el telescopio de alcance "más ilimitado" posible? Pues bien, estrellas, cada vez mas jóvenes, por cierto, pero siempre algo, y nunca la nada, o caeríamos en la llamada "paradoja del borde cósmico": si el universo tiene borde (más allá del cual está "la nada"), pues bien, si yo llego hasta allí y saco la mano, ¿dónde está mi mano? Si mi mano está en el universo –como corresponde que esté– entonces el universo es un poquito más grande de lo que yo pensaba, y así siguiendo –repitiendo esta experiencia una y otra vez– vería que el universo no puede tener borde. En particular, ¿qué vería mi telescopio si yo lo enfocara a la mayor distancia posible? Pues bien, me mostraría el estado del universo cuando éste tenía unos 300.000 años. Eso es precisamente lo que vemos en la radiación cósmica del fondo de microondas: la imagen (en radiación, que hoy detectamos en la banda de las microondas) más temprana de nuestro universo, cuando apenas comenzaban a formarse los átomos neutros más livianos y aún no existían estrellas ni ninguna otra forma de materia organizada. Decenas de experimentos ya han detectado este fondo cósmico de radiación y han estudiado sus más íntimos detalles. Son estos bits de información los que nos permiten afirmar que el universo tiene unos 13.700 millones de años de vida, que existe una forma de energía dominante en el universo hoy que no comparte la misma materia prima que la que nos forma a nosotros, etc etc..

Pasemos ahora a considerar el "momento" en el que se produjo el Big Bang, y el "lugar" en donde se produjo el Big Bang. Si el Big Bang es realmente el "evento" en el que se crearon el espacio y el tiempo cósmicos, no tiene sentido preguntarse dónde ni

cuándo se produjo el Big Bang. De hecho, hoy sabemos que el modelo del Big Bang no explica "el Big Bang". ¿Confuso? En otras palabras, "Big Bang" es el nombre del modelo científico más preciso que tenemos hoy sobre la evolución del universo y sobre el origen de las estructuras cósmicas que en él habitan, NO sobre el origen del universo. Para tiempos muy remotos, menores que ínfimas fracciones de segundo, la física de estos modelos se vuelve muy –excesivamente, según muchos– especulativa. Para tiempos aún menores a estos, por debajo de los 10^{-43} segundos (el llamado tiempo de Planck), la descripción del universo dada por la teoría de la Relatividad General directamente "se quiebra" y la teoría se vuelve no predictiva. Aparecen infinitos matemáticos en cada observable que uno quiere calcular y la teoría ya no sirve. Querer "llegar al Big Bang" usando el modelo del Big Bang es el error más común que, lamentablemente, vemos repetirse en casi todos los programas de TV de la actualidad.

En lo que respecta al futuro de la galaxia de Andrómeda y de la Vía Láctea, sí, en efecto, observaciones precisas y simulaciones numéricas recientes nos indican que en unos tres mil millones de años ambas galaxias espirales deberían cruzarse. Pero esto no contradice la expansión global del universo que fuera descubierta por Hubble en 1929. Sucede que ambas galaxias no se hallan lo suficientemente alejadas como para poder afirmar que los efectos locales son despreciables y que es tan sólo la expansión del universo la que domina la dinámica conjunta de estas galaxias. Si pensamos en términos newtonianos, una de las galaxias está cayendo en el "pozo" de potencial gravitatorio de la otra, de forma análoga a la caída constante de la Luna en el "pozo gravitatorio" de la Tierra. Si lo pensamos teniendo en mente la Relatividad General de Einstein, una de las galaxias –tomemos por ejemplo la más masiva– deforma de tal manera el espacio a su alrededor que a la otra no le queda más opción que "caer" en esta deformación. La solución (cosmológica) de las ecuaciones de la Relatividad General que indica la expansión global del universo no contempla estos casos de galaxias tan cercanas. Cuando hablamos del universo a muy grandes escalas, como lo solemos hacer en cosmología, grupos de galaxias como las vecinas a la Vía Láctea son meramente "puntos", o quizás podríamos llamarlos partículas, de un inmenso "gas" de grupos de galaxias. Para los casos de interacción entre galaxias cercanas, existe otra solución de la Relatividad General, que si bien no es apta para describir el universo a gran escala, sí lo es para describir el campo gravitatorio cercano a un objeto masivo, ya se trate éste de la Tierra, de galaxias o incluso de un agujero negro.

Con todo esto, esperemos que en el futuro no se siga afirmando que el Big Bang es "una explosión".

Sinceramente, Alejandro

Glosario general

Abierto (espacio): En cosmología, se refiere a un espacio de volumen infinito y sin bordes. Por ejemplo, el espacio euclideo o el espacio hiperbólico de topología simple.

Abundancias: Las cantidades relativas de elementos químicos. Por ejemplo, el hidrógeno forma aproximadamente el 75% de la masa del universo; su abundancia cósmica es 75%.

Absorción: Disminución de la intensidad de la radiación en determinadas frecuencias debido a que ésta es utilizada para excitar a un átomo o una molécula. El átomo o la molécula pasa entonces a un estado cuántico de mayor energía, pudiendo incluso perder electrones, en un proceso llamado de ionización. En el caso del átomo excitado, la reemisión del exceso de energía, en forma de un fotón, se hará en una dirección arbitraria, y no necesariamente en la misma en la que venía la radiación que excitó el átomo. Por lo tanto, esa frecuencia particular estará ausente del campo de radiación, lo que dará origen a líneas de absorción en el espectro de la luz recibida.

Acelerador (de partículas): Máquinas en donde se aceleran núcleos y partículas elementales a velocidades próximas a la de la luz, para luego hacerlas chocar. Esta energía disponible permite crear nuevas y más masivas partículas, y así poder estudiar la estructura íntima de la materia.

Agujero negro: Objeto astrofísico con un campo gravitatorio tan grande, que ni siquiera la luz puede escapar (y por supuesto, tampoco pueden hacerlo partículas materiales u otra forma de información). Se forma, por ejemplo, como producto del colapso gravitatorio de una estrella suficientemente masiva. En otros términos, el campo gravitatorio de un agujero negro es tan grande que la velocidad de escape en su superficie (que en el caso de la Tierra es de "apenas" unos 11 km/segundo) excede la velocidad de la luz. Los objetos pueden caer dentro del agu-

jero, pero, de acuerdo a la física clásica (no cuántica), ninguna forma de energía puede salir de él. En teoría cuántica, el inmenso campo gravitatorio permite la creación de pares de partículas justo en el "borde" del agujero. Si una de éstas es "tragada" mientras que la otra escapa, esta última constituirá la llamada radiación de Hawking; los agujeros negros no serían tan negros, después de todo.

Angstrom: Medida de longitud equivalente a 10^{-10} metros. Es empleada comúnmente para describir longitudes de onda, por ejemplo en el rango visible, que va de unos 4.000 a unos 7.000 Angstrom. Un Angstrom es la medida característica de un átomo de hidrógeno; el diámetro de un cabello humano ronda el medio millón de Angstrom.

Anisotropía: Diferencias en una propiedad física entre dos o más direcciones, como en el caso de las anisotropías en la temperatura de la radiación cósmica de fondo.

Anisotropías en la radiación de fondo: Diferencias de intensidad (o de temperatura efectiva) presentes en el campo de la radiación cósmica del fondo de microondas. Estas diferencias de intensidad revelan inhomogeneidades en la distribución de materia-energía, así como también la posible existencia de ondas gravitatorias, que habrían perturbado a los fotones del fondo cósmico en su viaje hacia nuestros detectores. Las anisotropías detectadas en muy distintas escalas angulares sobre el cielo de microondas, revelan también los detalles de procesos astrofísicos más recientes y que son sumamente importantes a la hora de estimar ciertos de los (aún poco conocidos) parámetros cosmológicos de nuestro universo.

Año luz: Es una medida astronómica de distancia, equivalente al recorrido de la luz en el vacío en un año (estrictamente, un año juliano de 365,25 días). Equivale a unas 63.241 unidades astronómicas y unos 9,5 billones de kilómetros ($9{,}46 \times 10^{12}$km).

Antimateria: Materia que cuenta con las mismas propiedades gravitatorias que la materia ordinaria, pero que tiene la carga eléctrica opuesta; tiene también "cargas" opuestas para las otras fuerzas nucleares: las fuerzas nucleares débil y fuerte. Hoy, la producción experimental de antimateria es un proceso rutinario en los aceleradores de partículas, pero existen pocas trazas de antimateria en la Naturaleza.

Antipartícula: Una partícula de antimateria. La antipartícula del neutrino es el antineutrino; la del protón es el antiprotón; la del electrón es el positrón (o antielectrón), etc.

Antrópico (principio): Ver Principio ANTRÓPICO.

Asteroides: Son cuerpos rocosos demasiado pequeños para llamarlos planetas que orbitan el

Sol. Oscilan en tamaño entre unos centímetros y 1.000km de diámetro (el último es el tamaño de Ceres). Aunque se los encuentra a muchas distancias del Sol, hay una importante concentración de ellos entre Marte y Júpiter, el llamado cinturón de asteroides.

Astrofísica: Rama de la ciencia que estudia la física de los astros. No la ubicación de los astros, sino "qué" son los astros. También es la aplicación de las leyes de la física, de la química y de otras ciencias, para lograr comprender los fenómenos que toman lugar en los planetas, estrellas, etc. La astrofísica tuvo sus inicios con el advenimiento de la espectroscopía, lo que le permitió descifrar la información que, a través de la luz, nos llega de los astros.

Barión: Partículas subatómicas que interactúan a través de la interacción nuclear fuerte, compuestas por tres quarks. Su nombre proviene del griego "barys" que significa pesado. El neutrón y el protón son ejemplos de bariones.

Big Bang: Conjunto de modelos cosmológicos para la evolución del universo, con un estado primordial altamente energético, denso y caliente, donde el espacio-tiempo comienza con una singularidad que inicia un periodo de expansión global. De acuerdo a estos modelos, el universo se ha estado expandiendo, enrareciendo y enfriando desde sus inicios, y durante unos 15 mil millones de años.

Big Crunch: "Alter ego" del Big Bang. Evento catastrófico final en un universo que primero se expande y que, luego de alcanzar un tamaño máximo, colapsa sobre sí mismo, producto de la excesiva densidad de materia-energía que contiene (traducción: gran crujido o colapso). Las leyes físicas conocidas hoy no permiten aún modelar este hipotético "evento final" para el universo.

Binarias (estrellas): Sistema astronómico formado por dos estrellas unidas por su mutua atracción gravitatoria. Las estrellas se mueven en órbitas elípticas alrededor de un centro común, llamado centro de masa del par. Se cree que, al menos la mitad de las estrellas en las cercanías del sistema solar pertenecen a este grupo. Los periodos de las órbitas van de apenas horas a millones de años; sus separaciones, de apenas unos pocos radios estelares a algunas décimas de parsecs. La forma de sus órbitas puede variar fuertemente, y ser desde excesivamente excéntricas, hasta casi circulares.

Bosón: Partícula con cantidad entera de la unidad básica de espin "$h/(2\Pi)$" [esto es, -2, -1, 0, 1, 2, etc., multiplicados por $h/(2\Pi)$], donde "h" es la constante de Planck. Son, típicamente, partículas mediadoras (o mensajeras) de las interacciones fundamentales. Por ejemplo, el fotón, de espin 1 [multiplicado por $h/(2\Pi)$] es el mediador de la interacción electromagnética; el gluon lo es de la interacción nuclear fuerte, el graviton, de la gravitación, etc. Existen también partículas compuestas de pares de fermiones cuyo espin suma cantidades enteras y, por

lo tanto, son bosones. Deben su nombre al físico indio Satyendra Bose (1894-1974).

Brana (membrana): En general, objetos "extensos" que surgen en las teorías que pretenden unificar la relatividad general de Einstein con la teoría cuántica. Una 1-brana es una cuerda, una 2-brana es una membrana, etc.

Causalidad: Propiedad que debe satisfacer un sistema físico de acuerdo con la teoría de la relatividad especial, según la cual ninguna forma de energía (o información) puede propagarse a velocidad mayor que la de la luz.

Cero absoluto: Corresponde al valor más bajo de la escala absoluta de temperaturas: 0 kelvin corresponde a -273,15 grados Celsius.

Cerrado (espacio): Espacio de volumen finito y sin bordes, como la superficie de una esfera.

Cerrado (universo): Modelo cosmológico de Friedmann-Lemaître, con volumen finito y curvatura espacial positiva. Corresponde a modelos con alta densidad de materia-energía, que podrían eventualmente colapsar por su propio peso en una suerte de Big Crunch.

Cinturón de Kuiper: Es una región del sistema solar ubicada más allá de la órbita de Neptuno, a una distancia de entre 30 y 55 UA del Sol. Lleva el nombre de uno de sus descubridores, el astrónomo holandés residente en los EEUU Gerard Kuiper. Su existencia fue confirmada en 1992. Es semejante a la franja de asteroides, pero mucho mayor: 20 veces más ancha y con objetos cuya masa es entre 20 y 200 veces más alta. Se compone de cuerpos diversos, cuya existencia se remonta a la formación del sistema solar, incluso planetas enanos (categoría en la que fue incluido el antes considerado planeta Plutón). A diferencia de los cuerpos del cinturón de asteroides, que son rocosos y metalíferos, los de Kuiper son formados sobre todo de gases (como metano y amoníaco) y de agua congelados.

Constante cosmológica (o Lambda): Responde a un término agregado por Einstein en 1917 a sus ecuaciones originales de la relatividad general. La idea era, mediante este término, frenar la tendencia de la materia ordinaria a colapsar por su propia atracción gravitacional. Einstein obtenía así un modelo estático (aunque altamente inestable, como más tarde se descubriría), en acuerdo con las incipientes observaciones de la época. Años más tarde, el descubrimiento de la expansión del universo hizo que los cosmólogos desecharan la necesidad de una constante cosmológica. Hoy, y desde hace ya unos años, nuevas observaciones han hecho que la constante cosmológica vuelva a formar parte de los modelos cosmológicos que mejor reproducen las observaciones astrofísicas.

Constante cosmológica (problema de la): Dificultad con la que conviven (esencialmente desde 1917) los físicos que estudian las teorías de altas energías y los cosmólogos, al no tener indicios claros sobre el origen físico, ni sobre la magnitud del término de constante cosmológica que Einstein agregara en sus ecuaciones originales de la relatividad general de 1916.

Corrimiento al rojo (z): Corrimiento de las líneas espectrales hacia mayores longitudes de onda debido a un movimiento de alejamiento o recesión de la fuente emisora. En cosmología relativista, este efecto es debido a la expansión del universo que "arrastra" a las galaxias lejanas y produce un estiramiento de las longitudes de onda características de su luz. Notar que este efecto NO es lo mismo que el efecto Doppler-Fizeau, aunque para "z" pequeños ambos dan aproximadamente el mismo resultado. En el caso cosmológico, la onda de luz viaja a través del espacio al mismo tiempo que este espacio se estira. Por ello, también la longitud de onda de la luz se estirará, ocasionando un corrimiento al rojo. Cuanto más alejada está la fuente emisora, más espacio deberá recorrer la luz y por ello, más se estirará su longitud de onda.

Corrimiento al azul: Corrimiento de las líneas espectrales hacia menores longitudes de onda debido a un movimiento de acercamiento de la fuente emisora.

Cosmogonía: Disciplina relacionada con el origen del cosmos. En cosmología, también se refiere al estudio del origen de los sistemas astronómicos, desde sistemas solares hasta estrellas, galaxias y cúmulos galácticos.

Cosmología: El estudio de la estructura y evolución del universo, y de sus constituyentes, a las mayores escalas astronómicas imaginables. Es también nuestro interés en estudiar el cosmos y conocer el lugar que en él ocupamos.

Cosmología cuántica: Área de la cosmología que estudia el universo primitivo en épocas previas al tiempo de Planck, 10^{-43} de segundo, cuando tanto los efectos relativistas (dados por la relatividad general) como los cuánticos (dados por la teoría cuántica) son muy importantes.

Cosmología relativista: La aplicación de las ecuaciones de la teoría de la relatividad general de Einstein al universo, nos permite describir su evolución relativista en una manera completamente distinta a la de la teoría newtoniana. Los modelos del Big Bang surgen de esta nueva descripción del universo.

Cuántica (mecánica): Es la teoría que describe el reino de las partículas subatómicas. Explica la interacción entre la radiación y la materia con un formalismo que surgió a partir de los estudios realizados por el físico alemán Max Planck y que llevaron a la comprensión de que la energía se transmite, no en forma continua, sino en pequeñas unidades discretas, o cuantos.

Explica, además, el origen de las líneas espectrales que se detectan en astronomía, como transiciones cuánticas entre niveles de diferente energía de los átomos y moléculas, y es la teoría que deberá un día amalgamarse adecuadamente con la relatividad general para poder describir el cosmos en épocas ultra primordiales, por debajo de la escala de Planck.

Cuerpo negro: Objeto ideal que absorbe y emite radiación de todas las longitudes de onda.

Cuerpo negro (radiación de): Campo de radiación cuya distribución de intensidad versus la frecuencia (su espectro) corresponde a la de un cuerpo negro y sigue una ley muy conocida en física llamada la ley de Planck. Sus características dependen sólo de la temperatura del cuerpo negro. En el caso cosmológico, este tipo de radiación se genera cuando partículas materiales y fotones llegan a un estado de equilibrio térmico, donde cada reacción es balanceada por la reacción opuesta, y donde todos los constituyentes del universo comparten la misma temperatura. La radiación cósmica del fondo de microondas es de este tipo.

Cuerdas (teoría de): Teoría de gran unificación de las fuerzas fundamentales de la física, que postula que los ingredientes más básicos de la Naturaleza no son partículas sin dimensión matemática, sino diminutos filamentos unidimensionales llamados cuerdas. Aunque no está libre de problemas técnicos, la teoría de cuerdas amalgama las teorías de la relatividad general de Einstein (cuyas leyes describen el universo a gran escala, macroscópico) con la mecánica cuántica (la teoría que describe el reino subatómico).

Cúmulos galácticos: Grupos de galaxias, que pueden incluir desde varias decenas de unidades (como en el caso de nuestro Grupo Local) hasta un número mucho mayor que mil galaxias (como en el caso del cúmulo de Virgo).

Defecto topológico cósmico: Mucho de lo que hoy se sabe en física de las altas energías se basa en procesos genéricos conocidos como "procesos de rotura de las simetrías fundamentales". Estas roturas de simetría se producen durante transiciones de fase cosmológicas y muchas de estas últimas pudieron haber sucedido en el universo primitivo, en las inmensas energías y temperaturas cercanas a la singularidad de los modelos del Big Bang. Una predicción genérica de muchos modelos cosmológicos de altas energías es la producción de defectos cósmicos durante estas transiciones de fase. De la misma manera que la estructura cristalina del hielo, formado sobre la superficie de un lago al descender la temperatura, no está libre de defectos, el volumen de nuestro universo, al disminuir su temperatura, también habría formado defectos en aquellos campos de energía primordiales que dominaban el universo en épocas tempranas. En el caso del hielo, son llamados "defectos" pues constituyen regiones donde la estructura cristalina del hielo se altera, y "topológicos" pues su completa descripción precisa de elementos de simetría, cuya descripción formal se halla en la rama

de las matemáticas conocida bajo el nombre de topología. En el caso de los defectos cósmicos, lo que se altera es la estructura misma (la topología) del espacio-tiempo. Existen defectos cósmicos de varios tipos y dimensiones. Muchos son incompatibles con la cosmología estándar, pero también existen otros que conviven armoniosamente con ella, y que hasta podrían responder a ciertos enigmas aún oscuros de la cosmología actual.

Deferente: En los modelos ptolomeicos más simples del universo, el deferente es el gran círculo orbital que sigue el centro del pequeño epiciclo circular de un planeta. El centro del deferente coincide con el centro de la Tierra. Modelos algo más complicados desplazan al centro del deferente del centro de la Tierra para ubicarlo en un punto intermedio entre la Tierra y el punto llamado ecuante.

Densidad crítica: Densidad de materia-energía cósmica que separa universos de curvaturas y dinámicas muy diferentes. Dado que en la teoría de la relatividad general la materia-energía curva el espacio-tiempo, el valor de la densidad de energía-materia, de ser conocido, podría indicarnos, por ejemplo, la curvatura global del universo. El valor de la densidad crítica depende de la época cosmológica y también del valor exacto de la tasa de expansión del universo (el parámetro de Hubble). Su valor actual es de aproximadamente unos 10^{-29} gramos por centímetro cúbico, lo que equivale a unos pocos átomos de hidrógeno por metro cúbico. Por referencia, el número de partículas (átomos o moléculas) en un metro cúbico de gas a temperatura y presión normales es de unos 3×10^{25}.

Desacoplamiento (época del): Transición entre un estado altamente ionizado de la materia, y un estado donde la materia es predominantemente neutra. En los modelos del Big Bang, esta transición ocurre cuando la radiación, que era difundida constantemente por los electrones y demás materia ionizada, deja de serlo, al formarse los primeros átomos neutros. En ese entonces, el universo tenía entre unos 100 mil y unos 400 mil años de vida, y su temperatura característica rondaba los 4.000 grados kelvin. El fondo de radiación residual de este proceso de desacoplamiento (la llamada radiación cósmica del fondo de microondas) nos llega con un corrimiento al rojo de aproximadamente $z = 1.100$.

Deuterio (H-2 o ^2H): Isótopo pesado del hidrógeno, cuyo núcleo está formado por un protón y un neutrón (en lugar de solo un protón como en el caso del hidrógeno normal). Como en el hidrógeno, el átomo de deuterio posee sólo un electrón. Cuando un átomo de deuterio reemplaza a un átomo de hidrógeno en la molécula del agua (H_2O), se obtiene el agua pesada de uso corriente como moderador de las reacciones en las centrales nucleares. La abundancia de deuterio en el espacio interestelar es de sólo $1{,}4 \times 10^{-5}$ aquella del hidrógeno [en el Sol hay menos de 10^{-6} y en los océanos de la Tierra aproximadamente 10^{-4}]. Dado que el deuterio es rápidamente consumido en las reacciones nucleares estelares, se cree que la mayoría de su abundancia actual es primordial, esto es, que fue fabricado durante la nucleosíntesis primordial.

Difusión: Es la desviación de toda forma de radiación (incluyendo la luz visible) por su interacción con la materia. Por ejemplo, la luz de una linterna puede interactuar con las partículas de humo de una habitación. Como resultado esta luz es desviada en todas direcciones, haciéndose difusa. También se produce la difusión de la radiación en medios transparentes; es el caso de la interacción de los rayos solares con las moléculas del aire, cuyo resultado es el azul del cielo (en el rango visible, la luz más difundida es la azul). También se llama así al proceso de absorción y posterior re-emisión de los corpúsculos de luz (en todas direcciones) por la materia, sin cambios en su frecuencia o energía. La difusión de los fotones por la materia ionizada y los electrones libres es el proceso principal por el cual el universo temprano se muestra altamente opaco a la radiación.

Doppler-Fizeau (efecto): Modificación de la frecuencia de la radiación electromagnética debido al movimiento relativo entre fuente emisora y receptor. Si el objeto en movimiento se acerca al observador, las ondas que emite llegan a éste con mayor frecuencia, si se aleja sucede lo contrario. El fenómeno se produce también con el sonido: es conocido el caso de la locomotora lanzada a toda velocidad, cuyo sonido resulta más agudo que el original para a una persona inmóvil al lado de la vía a medida que se le acerca, y se vuelve cada vez más grave a medida que se le aleja. Sin embargo, hay una diferencia esencial: el sonido precisa de un medio (el aire) para propagarse; la ondas electromagnéticas, no. En el caso cosmológico, este efecto resulta en el corrimiento de todas las líneas espectrales debido al movimiento de acercamiento (corrimiento de las líneas hacia el azul) o alejamiento (corrimiento al rojo) de las fuentes emisoras relativamente cercanas (galaxias, estrellas...) a lo largo de la línea de visión.

Ecuante: En el modelo ptolomeico del universo, el ecuante es un punto del espacio alrededor del cual el centro del epiciclo de un planeta se desplaza a velocidad angular constante, a medida que este epiciclo se mueve a lo largo del deferente. El centro geométrico del deferente se ubica entre el ecuante y el centro de la Tierra y es un punto equidistante de los dos últimos.

Edad del universo: Tiempo transcurrido desde la singularidad predicha por los modelos del Big Bang y estimado entre los 10.000 y los 20.000 millones de años. Las últimas observaciones astrofísicas indican una "edad del universo" de aproximadamente unos 14 mil millones de años. Muchas veces se hace referencia con este nombre al "tiempo característico" de evolución de nuestro universo, dado, por ejemplo, por el tiempo que tarda el universo observable en duplicar su tamaño. Esta última interpretación es la más correcta, y es válida aún en el caso en que el universo fuera eterno hacia el pasado, esto es, que no existiese un origen de tiempos.

Electrón voltio (eV): Es una unidad de energía usada en física. Equivale a la energía que adquiere un electrón al atravesar una diferencia de potencial de un voltio. Un eV es una cantidad muy pequeña de energía en una escala macroscópica, pero es conveniente en la descripción

de procesos atómicos. Por ejemplo, 13,6 eV es la energía necesaria para desprender un electrón de un átomo de hidrógeno.

Elipse: Una curva plana donde la suma de las distancias de cualquier punto a los focos es una constante.

Emisión: La transición cuántica entre un estado de alta energía y uno de energía menor, por ejemplo, en los átomos o moléculas, resulta en la emisión de un corpúsculo de radiación (un fotón) con la diferencia de energía. Esta radiación emitida por el átomo o molécula es lo que se denomina una línea de emisión. Estas líneas caracterizan los distintos niveles cuánticos de la materia.

Enana blanca: Una estrella pequeña, de débil luminosidad, densa y "moribunda" (en las etapas finales de su evolución) que ha consumido la totalidad de su combustible nuclear y lentamente se va perdiendo de vista. Las estrellas cuya masa está por debajo de 1,4 veces la masa del Sol, se convierten normalmente en enanas blancas hacia el final de sus vidas. Una enana blanca típica es fría y densa, y cuenta con el 60% de la masa solar, pero es de tamaño apenas mayor que la Tierra. Son estrellas muy comunes: un 10% de las estrellas de nuestra galaxia serían de este tipo. La más cercana es Sirio B, a unos 8,7 años-luz de distancia. Ninguna es visible sin telescopio.

Estrellas de neutrones: Estrellas extremadamente densas producto del colapso gravitacional de estrellas de muy alta masa. Están compuestas casi enteramente de neutrones, que son partículas subatómicas sin carga eléctrica y masa similar a la de los protones, y su densidad es semejante a la que resultaría de compactar el Sol a una esfera de 10 km de radio.

Enana marrón: Una proto-estrella con masa insuficiente como para iniciar la combustión termonuclear que transformará el hidrógeno en helio. Sus masas van desde la masa de Júpiter hasta un 10% de la masa solar (la masa mínima necesaria para iniciar el proceso de fusión termonuclear). Son objetos relativamente fríos, con temperaturas por debajo de los 1.000 kelvin, y por ello emiten radiación en el infrarrojo. Podrían formar parte de la materia oscura que se piensa hoy que debe existir en las galaxias y cúmulos galácticos.

Energía oscura: Hipotética forma de energía cosmológica que no emite radiación u otra señal que podamos detectar. Su presencia debe inferirse por mediciones dinámicas a través de sus efectos gravitatorios sobre los otros componentes ordinarios de materia-energía del universo y por sus efectos sobre la expansión del universo. Existen en la actualidad varios candidatos para la energía oscura, siendo la constante cosmológica de Einstein y los campos llamados "de quintaesencia" los más estudiados.

Epiciclos: Circunferencias imaginarias que recorrerían los planetas, y cuyos centros se desplazarían alrededor de la Tierra a lo largo de circunferencias aún mayores llamadas deferentes. Ptolomeo empleó este artilugio matemático para tratar de explicar las observaciones de la época en el marco de su modelo geocéntrico, y tratar así de "salvar las apariencias".

Época dominada por la materia: En los modelos del Big Bang, es la época posterior a los 30 mil años de vida del universo, cuando la densidad de la materia relativista (radiación) se hace menor que la de la materia no relativista. Es, en principio, a partir de este momento que se puede iniciar la formación de estructuras astrofísicas. Sin embargo, la materia bariónica tardará un poco más en estructurarse, debido a su fuerte acoplamiento con la radiación, que frenara todo intento de amplificación de los grumos de materia ordinaria. De ahí la importancia que tiene la materia oscura (fría), ya que esta última, que no interactúa con la radiación, podrá comenzar a aglutinarse apenas comenzada la época dominada por la materia, y serán luego los bariones los que se verán atraídos a los grumos de materia oscura, una vez logrado su desacople. La materia oscura permite entonces comenzar antes –varios cientos de miles de años antes– el proceso de formación de estructuras que, de otra manera, no podríamos llegar a explicar.

Época dominada por la radiación: En los modelos del Big Bang, la evolución cosmológica está dominada por la radiación, desde épocas muy tempranas y hasta que el universo llega a unos 30 mil años de vida. Será luego la densidad en materia no relativista la que dominará el universo hasta la actualidad (o hasta valores de corrimientos al rojo z pequeños, si el universo es realmente dominado por un término de constante cosmológica como lo indican las observaciones actuales). Durante la época dominada por la radiación toma lugar, por ejemplo, la llamada nucleosíntesis primordial, periodo durante el cual se construyen los núcleos de los átomos más livianos del universo.

Esférico (espacio): Espacio tridimensional empleado en cosmología como una de las alternativas de los modelos del Big Bang. Su geometría puede visualizarse como la superficie de una esfera en tres dimensiones. Su curvatura es positiva; la suma de los ángulos interiores de un triángulo siempre suman más de 180 grados; y dos geodesias que parten en direcciones paralelas terminarán por converger, de la misma manera que los meridianos terrestres, paralelos a la altura del Ecuador, se cortan en los polos de la Tierra.

Espacio-tiempo: La unión del espacio (tridimensional) y del tiempo (la cuarta dimensión), que constituye uno de los postulados de la teoría especial de la relatividad. Con la presencia de materia-energía, en el marco de la relatividad general, este espacio-tiempo de cuatro dimensiones se deforma y se curva. Con ciertas limitaciones, puede verse como la superficie de una "tela", dinámica y deformable, en donde toman lugar los eventos de la historia del universo.

Espacio-tiempo absoluto: En la teoría newtoniana se supone implícitamente que las medidas de tiempo y las medidas de longitud de los cuerpos físicos son independientes del sistema de referencia y del estado de movimiento del observador. Esto cambia con la relatividad especial de Einstein.

Espectro: Separación de la luz de acuerdo a su longitud de onda. El espectro de un dado elemento o compuesto contiene líneas espectrales características.

Espectroscopia: Método de separación de la luz en los distintos "colores" que la forman de manera de obtener su espectro. Permite conocer la composición de objetos astronómicos a partir de sus líneas espectrales.

Espin: Una propiedad cuántica de las partículas y de sus campos asociados. Estos campos tienen espin dado por un valor entero o "semi-entero" de la unidad básica "h/(2 Π)", donde "h" es la constante de Planck. En la física clásica (no cuántica) el valor de "h" es extremadamente pequeño, y propiedades como la del espin no son observables ni relevantes.

Estado estacionario (modelo del): Modelo cosmológico alternativo a los modelos del Big Bang, propuesto por Bondi, Gold y Hoyle, que hasta la década del 1960 contaba con muchos cosmólogos adeptos. Se basa en el llamado "principio cosmológico perfecto", extensión del principio cosmológico también a la coordenada temporal, según el cual el universo debe ser isótropo y homogéneo para todo posible observador y además debe mostrarse idéntico a sí mismo en todo instante de tiempo. Este modelo es compatible con un universo en expansión, aunque se opone a la idea de evolución, y por ende a la de un universo que alguna vez fue diferente del presente, como lo afirman los modelos del Big Bang. Para evitar que la distribución de materia se diluyese por la expansión cosmológica, se debió inventar un mecanismo "ad hoc" de creación continua de materia, de aproximadamente un átomo de hidrógeno por metro cúbico, cada 10 mil millones de años. Luego de varias observaciones contrarias a sus predicciones teóricas, el modelo del estado estacionario sobrevive tan sólo entre unos pocos "irrompibles".

Éter: Medio material hipotético a través del cual se pensó una vez que se propagaban las ondas electromagnéticas de Maxwell, de manera idéntica a como el aire da sustento a la propagación de las ondas de sonido. Fue desechado con el advenimiento de la teoría especial de la relatividad. El éter fue también considerado el quinto elemento, omnipresente en los cielos, en la visión de Platón y Aristóteles.

Excentricidad: En astronomía, es una medida que nos indica cuánto una órbita elíptica se aleja en su forma de la órbita circular. Se la expresa generalmente como una fracción decimal o con un porcentaje. La órbita circular tiene excentricidad cero.

Exoplanetas: Todos aquellos planetas que orbitan alrededor de una estrella que no es el Sol.

Fermión: Partícula con cantidad "semi-entera" de la unidad básica de espin "h/(2 Π)" [esto es, -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, etc., multiplicados por h/(2 Π)], donde "h" es la constante de Planck. Son típicamente partículas de materia. Por ejemplo, los nucleones (también llamados bariones, como los protones y los neutrones) son fermiones; los electrones y los neutrinos (llamados leptones) también son fermiones. Deben su nombre al físico italiano Enrico Fermi (1901-1954).

Física de altas energías: Es la rama de la física que estudia los constituyentes más básicos de la materia, y para acceder a los cuales muchas veces es preciso el empleo de potentes aceleradores de partículas. Esta área busca también comprender las distintas interacciones o fuerzas fundamentales de la física, como las fuerzas nucleares débil y fuerte.

Fluctuaciones cosmológicas: Ver perturbaciones cosmológicas.

Fluctuaciones en la radiación de fondo: Ver anisotropias en la radiación de fondo.

Foco: En una elipse, como la que describen los planetas alrededor del Sol en la cosmología newtoniana, son aquellos dos puntos ubicados en el eje mayor cuyas distancias al planeta, sumadas, es una constante (distinta para cada planeta). El Sol se ubica en uno de los focos de las órbitas elípticas de los planetas.

Fotón: Cuanto o corpúsculo de luz, es una unidad discreta de energía del campo electromagnético. El fotón es la "partícula" sin masa que transmite la interacción electromagnética. Su energía es proporcional a la frecuencia de la radiación. El valor de espin del fotón es 1 (es un bosón) y él es su misma antipartícula.

Frecuencia: Es el número de ciclos por unidad de tiempo de un fenómeno cíclico, por ejemplo, una onda electromagnética. Véase Longitud de onda.

Friedmann (ecuación de): La ecuación que determina la evolución del universo, bajo las hipótesis de un universo isótropo y homogéneo. Se obtiene de las ecuaciones de la relatividad general y expresa la conservación de la energía total del universo. Su solución indica la manera en la que la distancia de dos puntos (galaxias) suficientemente alejados del universo se modifica con el tiempo.

Friedmann-Lemaître (universos de): Una clase general de modelos cosmológicos que suponen que el universo a las mayores escalas astrofísicas es homogéneo e isótropo, y que evoluciona en el tiempo. Estos son los modelos del Big Bang a los que nos referimos en el presente libro.

Galaxia: Es un sistema astronómico sujeto a la fuerza de gravedad compuesto por estrellas, remanentes estelares, gas y polvo interestelar, más un componente aún misterioso llamado materia oscura. Las galaxias suelen contener múltiples sistemas estelares y planetarios (como el sistema solar, que forma parte de la Vía Láctea, la galaxia que habitamos), cúmulos de estrellas y nubes interestelares. El sistema rota alrededor de su centro de masa. Se estima que el universo observable contiene más de 100.000 millones de galaxias, con diámetros que oscilan entre unos 3.000 y 300.000 años luz, separadas entre ellas por distancias de millones de años luz. El espacio intergaláctico contiene un tenue gas, con densidades del orden de un átomo por metro cúbico.

Galaxias de núcleo activo: Son galaxias en cuyo centro hay una región de muy alta luminosidad en algunas o todas las regiones del espectro electromagnético. Son las fuentes persistentes de radiación electromagnética más luminosas del Universo.

Galaxia enana: Es una galaxia pequeña, compuesta por algunos miles de millones de estrellas, en comparación con la Vía Láctea, que podría alcanzar los 400.000 millones de estrellas.

Galaxia espiral: Es una estructura astronómica con la forma de un disco chato con brazos en espiral. El disco rota y está compuesto por estrellas, gas y polvo interestelar, con un núcleo central de estrellas conocido por el nombre de bulbo (en inglés bulge). Las estrellas del núcleo están rodeadas por una aureola o halo más débil de estrellas, muchas de las cuales forman cúmulos globulares (globular clusters). La Vía Láctea pertenece a esta categoría de galaxias.

Gamma (rayos): Radiación electromagnética de muy alta energía y poder de penetración. Se considera rayos gamma a aquellos fotones con longitudes de onda inferiores al Angstrom y frecuencias mayores que aproximadamente 10^{19} hertz.

Geocéntricas (cosmologías): Grupo de antiguos modelos cosmológicos en donde la Tierra permanecía quieta en el centro del universo y donde el Sol, la Luna, los planetas, e incluso las estrellas ("fijas" sobre una gran esfera), revolucionaban a su alrededor.

Gigantes rojas: Etapa tardía en la vida de una estrella, cuando ha gastado como combustible todas sus reservas de hidrógeno y la estrella se expande y su superficie se enfría, convirtiéndose en gigante y roja.

Gran unificación (teorías de): Clase especulativa de teorías de las interacciones fundamentales, donde se trata de describir al electromagnetismo y a las fuerzas nucleares fuerte y débil bajo un mismo marco teórico, consistente y unificado. Sólo la gravitación es dejada de lado. La unificación última se daría a la escala de Planck y debería incluir también el campo gravita-

torio. Las teorías "gran unificadas" (llamadas GUTs, acrónimo de Gran Unified Theories) intentan explicar las distintas fuerzas de la naturaleza como manifestaciones "de baja energía" de una única "súper fuerza" que habría dominado en épocas ultra primordiales.

Gravitatoria (fuerza): Es la más débil de las cuatro interacciones fundamentales de la física. Fue primero descripta por la teoría de la gravitación universal de Newton y luego por la teoría general de la relatividad de Einstein.

Gravitino: Hipotética partícula fermiónica "partner" del gravitón, y cuya existencia es predicha por las teorías de supergravedad que generalizan la relatividad general de Einstein.

Gravitón: Partícula sin masa que cristaliza la supuesta cuantificación del campo gravitatorio, de la misma manera que el fotón es la partícula asociada al campo electromagnético. El gravitón es el mediador de la interacción gravitatoria, como el fotón lo es de la interacción electromagnética y, en el marco de una teoría cuántica de la gravedad apropiada, puede vérselo como un cuanto de la curvatura del espacio-tiempo.

Grupo local de galaxias: Asociación de aproximadamente treinta galaxias cercanas a la nuestra y que se hallan ligadas gravitacionalmente. Es el cúmulo de galaxias al que pertenece la Vía Láctea y que tiene una dimensión de aproximadamente 1 megaparsec. Las dos mayores del grupo son la Vía Láctea y la galaxia de Andrómeda.

Hadrón: Del griego "hadros": robusto o pesado. Una de las dos familias de partículas elementales que forman toda la materia. Todos los hadrones se componen de quarks e interactúan a través de la fuerza nuclear fuerte. Los nucleones (neutrones y protones) son ejemplos de bariones, esto es, hadrones compuestos por tres quarks; los mesones son hadrones que se componen de dos quarks; existen muchos otros hadrones de mayores masas.

Halo: La "nube" aproximadamente esférica que rodea a las galaxias espirales. Contiene estrellas viejas y su masa excede con creces la masa del disco de la galaxia.

Heliocéntrica (cosmología): Modelo cosmológico en el cual es el Sol (y no la Tierra) el centro del universo. Alrededor de éste, se desplazan planetas y estrellas a distintas distancias. Es una buena aproximación si nos restringimos a distancias inferiores al tamaño del sistema solar, pero dista mucho de la realidad cuando tenemos en cuenta el desplazamiento del Sol dentro de la Vía Láctea, el movimiento de "caída" de nuestra galaxia hacia el cumulo de Virgo, la caída de Virgo hacia la concentración de masa llamada el Gran Atractor, etc, etc...

Hiperbólico (espacio): Espacio tridimensional empleado en cosmología como una de las alter-

nativas de los modelos del Big Bang. Su geometría puede visualizarse como la superficie de una silla de montar, pero en tres dimensiones. Su curvatura es negativa; la suma de los ángulos interiores de un triángulo siempre suman menos de 180 grados; dos geodésicas que parten en direcciones paralelas terminarán por divergir.

Horizonte de partículas: También llamados horizontes cosmológicos, estos cristalizan la idea de que en cosmología no es posible observar más allá de una cierta distancia finita a través del espacio. Nuestro horizonte está dado por la distancia que la luz ha podido recorrer desde las épocas más tempranas del universo. Objetos ubicados fuera de nuestro horizonte no han tenido aún el tiempo de hacernos llegar su señal.

Horizonte (problema del): Problema cosmológico asociado con la extrema uniformidad a gran escala del universo, esto es, con el hecho de que regiones separadas por grandes distancias, mucho mayores que la distancia que un rayo de luz puede cubrir en toda la historia del universo, nos muestran, sin embargo, idénticas propiedades, como por ejemplo la temperatura y las anisotropías de la radiación cósmica del fondo de microondas. Es un problema que los modelos del Big Bang permiten plantear, sin ofrecer, sin embargo, una solución adecuada, más que la hipótesis de que el universo habría comenzado en un estado de uniformidad casi perfecta, asunción ésta que no agrada a los cosmólogos. La solución de este problema debe buscarse en algún modelo del universo primordial que complemente el Big Bang, como por ejemplo, los modelos inflacionarios.

Hubble (H, parámetro de): Parámetro que indica la tasa de expansión del universo, generalmente expresado en las unidades "kilómetros por segundo por megaparsec". Es un parámetro que, en los modelos del Big Bang, varía con la época cosmológica; para un dado tiempo fijo, H es la "constante" de proporcionalidad entre la distancia a las galaxias y su velocidad de alejamiento, y fue introducida por Hubble, como producto de sus observaciones, a fines de los años 1920. Aún hoy no se conoce su valor exacto con precisión. Los valores actuales comúnmente aceptados, estimados a partir de toda una variedad de observaciones astrofísicas independientes, son próximos a H = 70 km/s/Mpc (con pequeñas barras de error). Esta cifra nos indica que dos galaxias separadas por 1 Mpc, se estarán alejando a una velocidad de 70 km/seg debido a la expansión del universo. En modelos simples, la inversa de H (con unidades de tiempo) nos da una idea de la "edad del universo", mientras que el producto de su inversa por la velocidad de la luz nos indica aproximadamente el tamaño del universo observable.

Hubble (ley de): Relación lineal aproximada que conecta la distancia a la que se hallan las galaxias lejanas con su velocidad de recesión o, equivalentemente, con el corrimiento al rojo (z) que la luz procedente de estas galaxias sufre en su viaje hasta nosotros. Es válida para velocidades de alejamiento menores que la de la luz, lo que equivale a valores de z inferiores a

la unidad. Galaxias que siguen precisamente esta ley (o en general, la relación de expansión dada por los modelos cosmológicos), se dice que están en el "flujo de Hubble". En la práctica, como el universo cercano no es homogéneo, sino que existen grandes concentraciones de masa que ejercen su atracción gravitatoria sobre las galaxias (así como también inmensos vacíos), el movimiento real de estas se aparta un poco de este flujo. Para distancias suficientemente grandes, estas velocidades "peculiares" son relativamente pequeñas y las velocidades de recesión medidas coinciden en muy buena aproximación con las dadas por el flujo de Hubble.

Inestabilidad gravitacional: Es el proceso mediante el cual pequeñas fluctuaciones de densidad de materia crecen por auto-gravitación (recordemos que la gravitación es siempre atractiva). En el caso de tratarse de materia-energía con un cierto grado de presión interna, este crecimiento sólo se da si la talla de las fluctuaciones excede un dado valor crítico, de tal manera que el "peso" de la materia gravitante sobrepase a la fuerza de la presión interna del gas que se le opone. La expansión del universo frena en cierto sentido esta inestabilidad, aunque no totalmente, y las fluctuaciones terminarán por crecer cada vez más, hasta convertirse eventualmente en las grandes estructuras astrofísicas que nos rodean hoy.

Inflación cósmica: Hipotético periodo primordial durante el cual el universo se habría expandido en forma dramática (explosiva) impulsado por una suerte de energía de vacío cósmica. Los modelos inflacionarios surgen de la unión de las teorías de gran unificación y la cosmología. Estos modelos proponen que una cierta etapa inflacionaria se habría iniciado en los primeros 10^{-35} segundos de vida del universo y, según muchos cosmólogos, sería el responsable del "Bang" de los modelos del Big Bang. La inflación resuelve algunos de los problemas de los modelos de la cosmología estándar, como el problema de la planitud espacial, y el problema del horizonte; brinda además el mecanismo adecuado para la generación de pequeñas fluctuaciones en la densidad de la materia, que estarían a la raíz de la generación de las grandes estructuras astrofísicas que existen en el universo actual.

Inflatón: Nombre dado a cualquier tipo de campo de gran unificación responsable de desencadenar un periodo inflacionario.

Ion: Es un átomo o molécula con carga eléctrica positiva o negativa por haber perdido o ganado, respectivamente, uno o más electrones.

Ionización: Es el proceso que convierte a un átomo o molécula en un ion, por adición o substracción de electrones.

Ionizada (materia): Forma de materia en donde los átomos se encuentran separados en núcleos

atómicos cargados eléctricamente (llamados iones) y electrones libres. Los gases ionizados interactúan fuertemente con la radiación y por ello, por ejemplo, durante las épocas tempranas de nuestro universo, la radiación se encontraba estrechamente ligada a la materia.

Isótopo: Núcleo atómico que posee idéntico número de protones que la especie más común, pero con un número diferente de neutrones. Por ejemplo, el núcleo del hidrógeno está formado por solo un protón; el deuterio es un isótopo del hidrógeno con un protón y un neutrón, mientras que el tritio es un isótopo aún más pesado pues contiene un protón y dos neutrones.

Isotropía: Que no depende de la dirección. En cosmología, el universo se dice isótropo si, para un dado observador, presenta iguales características en todas las direcciones.

Jovianos: Planetas gigantes que poseen una superficie gaseosa. Los planetas jovianos del sistema solar son Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Kelvin: Unidad de la escala absoluta de temperaturas, donde el cero absoluto, o cero kelvin, corresponde a 273,15 grados por debajo del punto de congelamiento del agua. Se usa a veces acompañado de la palabra "grado" (como en "la temperatura ambiente es de 295 grados kelvin"); esto último, sin embargo, es incorrecto. A partir del año 1968 se decidió que la unidad sería 295 kelvin (o 295 K) y no "295 grados kelvin". El nombre de esta unidad fue elegido en honor al físico irlandés William Thomson (1824-1907), Lord Kelvin of Largs (Netherhall in Largs, Escocia.)

Kepler (leyes de): Leyes que rigen el movimiento de planetas, cometas y todo objeto sujeto a la gravitación newtoniana. La primera ley de Kepler, o ley de las órbitas planetarias, afirma que estas órbitas son elipses (y no circunferencias) con el Sol ubicado en uno de los dos focos de la elipse. La segunda ley, llamada ley de las áreas, afirma que el movimiento de cada planeta es tal que la línea imaginaria que lo une al Sol barre áreas iguales en tiempos iguales. Así, cuanto más alejado del Sol se halle un planeta o cometa, más lento se desplazará en su órbita. La tercera ley, llamada la ley de los periodos, relaciona la forma de la órbita elíptica de un planeta con la duración de una revolución completa alrededor del Sol (su periodo), afirmando que el cociente entre el cubo del semieje mayor de la elipse y el cuadrado del periodo es el mismo (una constante) para todos los planetas.

Kiloparsec: Distancia equivalente a 1.000 parsecs, o bien $3{,}086 \times 10^{21}$ cm.

kpc: Ver Kiloparsec.
Lambda: Ver Constante cosmológica.

Lentes gravitatorias: Concentraciones de materia, como por ejemplo galaxias o cúmulos galácticos (o incluso el Sol), que "tuercen" la trayectoria de la luz de las estrellas o cuásares le-

janos. Es una predicción de la relatividad general, teoría según la cual el espacio en las vecindades de grandes concentraciones de materia se curva (se "hunde") modificando así las geodésicas de partículas o fotones que pasan cerca. De hallarse una dada concentración de materia a lo largo de la línea de visión, se formarán varias imágenes del mismo objeto ubicado por detrás de la "lente" (el deflector). Estas imágenes, a modo de espejismos, estarán más o menos deformadas, de acuerdo a la geometría fuente-deflector-observador.

Lepton: Del griego "leptos": fino o liviano. Una de las dos familias de partículas elementales que forman toda la materia. Se compone de seis miembros: las partículas llamadas electrón, muon y tau, con sus correspondientes neutrinos (a estos deben sumárseles también sus antipartículas).

Línea de universo: La trayectoria o "camino" seguido por las partículas en el espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Es el análogo a la distancia entre dos puntos distintos del espacio tridimensional usual. En el espacio-tiempo, los "puntos" se llaman eventos (ya que incluyen un punto espacial y un tiempo). Aunque un objeto se quede quieto en el mismo lugar del espacio (y por lo tanto, la distancia tridimensional recorrida es nula), su línea de mundo SI tendrá una cierta longitud, ya que la "distancia temporal" entre dos dados eventos no es nula (el tiempo pasa).

Líneas espectrales: Líneas distintivas en los espectros de emisión o absorción que se detectan de objetos astronómicos a determinadas longitudes de onda. Son causadas por transiciones atómicas o moleculares. En los átomos, es el resultado del "salto" de un electrón de uno de los estados cuánticos permitidos a otro. El electrón pasa a un estado más energético si el átomo absorbe un cuanto de luz con la energía apropiada (justo la energía diferencia entre los dos estados de la transición). Por el contrario, al desexcitarse el átomo, el electrón pasará a un estado de menor energía y resultará en la emisión de un cuanto de luz.

Longitud de onda: Es la distancia entre dos crestas consecutivas de una onda electromagnética. Se simboliza con la letra griega minúscula lambda. Es inversamente proporcional a la frecuencia, que indica número de ciclos por unidad de tiempo y se mide en herzios (Hz: un Hz es un ciclo por segundo). El producto de la frecuencia y la longitud de onda son igual a la velocidad de la luz. Múltiplos comunes del herzio para referirse a ondas de radio son el megaherzio (MHz=10^6 Hz) y el gigaherzio (GHz=10^9 Hz), respectivamente un millón y mil millones de veces mayores.

Luminosidad: El brillo intrínseco de una estrella. Generalmente, se la define en función de su magnitud absoluta.

M (teoría): Teoría "Madre" que une varias teorías de supercuerdas dentro de un marco mate-

mático más general. Está formulada en varias dimensiones (por encima de las 3 espaciales + 1 temporal); estas dimensiones suplementarias se habrían luego compactificado, resultando en nuestro espacio-tiempo estándar, de cuatro dimensiones. Es una teoría que permitiría describir el universo hasta épocas tan primordiales como la época de Planck, donde las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo no pueden ya dejarse de lado.

Magnitud: Es la medida (en escala logarítmica) usada para medir el brillo de un objeto astronómico. Se define de tal forma que números menores corresponden a brillos mayores; disminuir el brillo en 1 magnitud equivale a un factor de aumento de aproximadamente 2.5 en luminosidad. Una diferencia de 5 magnitudes corresponde a un factor 100 = $(2{,}512)^5$ en luminosidad, y una diferencia de 10 magnitudes corresponde a un factor 10.000 en luminosidad. Esta medida de luminosidad se emplea desde los tiempos de Hiparco en el siglo II a.C. y obedece al hecho de que la sensibilidad del ojo humano a la intensidad de la luz es logarítmica.

Magnitud absoluta (M): Unidad que expresa la luminosidad intrínseca de un astro, esto es, la energía por unidad de tiempo emitida por el objeto astronómico. Por ejemplo, el Sol tiene una magnitud absoluta de +4,83, mientras que Sirio, cuyo brillo intrínseco es mayor, tiene una magnitud absoluta de +1,43.

Magnitud aparente (m): Expresa la luminosidad de los astros vista desde la Tierra, independientemente de su verdadera distancia. En general, las estrellas más brillantes del cielo tienen magnitud aparente m = 1; las más débiles tienen m = 6. El Sol, la de mayor magnitud aparente tiene un valor negativo: m = -26,74, mientras que la Luna llena tiene m = -12,5 y Venus m = -4. La estrella más brillante de nuestro cielo nocturno es Sirio, con una magnitud aparente de m = -1,46. Durante una noche clara, el ojo humano distingue estrellas débiles de hasta magnitud aparente +6, y los grandes telescopios logran detectar objetos hasta magnitudes aparentes de aproximadamente unos +30.

Materia oscura: Toda forma de materia que no emite ningún tipo de radiación electromagnética (luz visible, rayos infrarrojos, ondas de radio, etcétera) que podamos detectar, y cuya presencia debe inferirse por mediciones dinámicas. Esto es, sólo la gravitación de esta materia no visible nos da indicio de su existencia. Hay pruebas observacionales de la existencia de materia oscura en las galaxias y cúmulos galácticos, posiblemente en forma de restos de estrellas masivas, de estrellas frustradas que nunca iniciaron la combustión nuclear o en forma de objetos de tipo planetas con masas como la de Júpiter. Se estima que la materia oscura es responsable de una parte substancial de la masa del universo, mayor incluso que la materia visible. Los físicos que estudian las partículas elementales a muy altas energías han propuesto numerosos candidatos para la materia oscura, a veces llamados WIMPs.

Materia oscura fría: Clase de posibles candidatos para la materia oscura, con la propiedad de que interactúan débilmente con la materia ordinaria y de que se desplazan a velocidades no relativistas alrededor de la época en que la materia comienza a dominar la expansión del universo. Esta materia oscura permite que la formación de estructuras astrofísicas comience antes de la época del desacople de los bariones y la radiación.

Mecánica cuántica: Ver Cuántica.

Megaparsec: Unidad de distancia equivalente a un millón de parsecs, o bien 3,086 x 10^{24} cm.

Modelo cosmológico: Se llama así a una descripción matemática del estado actual y evolución en el tiempo del universo. Para que tenga validez, los resultados de sus ecuaciones deben coincidir con las observaciones e, incluso, predecir fenómenos que confirmen observaciones futuras. Los modelos actuales se basan en las ecuaciones de la teoría general de la relatividad de Einstein y fueron desarrollados, entre otros, por el holandés Willem De Sitter (1872-1934), el belga Georges Lemaître (1894-1966) y el ruso Alexander Friedmann (1888-1922).

Modelo de materia oscura fría con constante cosmológica (o Lambda-CDM): Es un modelo cosmológico que concuerda con la teoría del Big Bang y que explica resultados que coinciden con las observaciones de grandes estructuras cósmicas, la luminosidad de las supernovas lejanas y la expansión del universo.

Monopolo magnético: Partícula predicha por las teorías de gran unificación y cuya excesiva abundancia presenta un serio problema para los modelos del Big Bang. Puede verse como un imán con un solo polo, jamás descubierto en los experimentos, y que resulta ser excesivamente masivo, teniendo en cuenta las energías a las que se habría originado (tan sólo tres órdenes de magnitud por debajo de la escala de Planck). La inflación cosmológica surgió como una posible solución de este problema del exceso de monopolos magnéticos.

Monopolos magnéticos (problema de los): Un problema que surge de la unión de las teorías de gran unificación y la cosmología estándar. La producción temprana de un número excesivo de monopolos cambiaría drásticamente la evolución e historia pasada de nuestro universo. La inflación diluye el número de monopolos observables, de manera de hacerlos compatibles (o, al menos, no nocivos) con la cosmología.

Mpc: Ver Megaparsec.

Muón: partícula subatómica de la familia de los leptones (lepton de segunda generación), unas 200 veces más masiva que el electrón e inestable. Se crea por colisiones de rayos cósmicos

en la alta atmósfera.

Nebular (hipótesis): Teoría de formación de nuestro sistema solar por la condensación y posterior colapso de una nube de gas lentamente rotante. En el proceso de colapso se forma un disco, del cual se irán separando los distintos planetas, por acumulación de materia debida a la atracción gravitatoria y al enfriamiento del gas. La región central, sometida a altas presiones, elevará su temperatura hasta "encenderse" en una estrella.

Nebulosa: Con este nombre se llamaba a todo tipo de objetos "nebulosos" del cielo en una época en que los telescopios no lograban resolver los detalles de estas formaciones. Hoy, muchas de estas nebulosas son llamadas galaxias, aunque otras terminaron siendo cúmulos galácticos, restos de supernovas, o incluso nubes de gas ionizado en nuestra propia galaxia.

Neutrino: Partícula elemental de la familia de los leptones (fino, liviano, del griego "leptos"). Partícula eléctricamente neutra, muy liviana (hasta hace poco tiempo se pensaba que no tenía masa) y muy débilmente interactuante (sujeta solo a la interacción nuclear débil).

Neutrón: Partícula sin carga eléctrica que, junto con el protón, integra el núcleo de todos los átomos excepto el hidrógeno. Este nucleón está formado por tres quarks (es un barión). En el interior del núcleo, el neutrón es estable, pero fuera de el, sufre un decaimiento radiactivo en unos pocos minutos, convirtiéndose en un protón, un electrón y un anti-neutrino.

Newton (G, constante de): Constante de proporcionalidad que aparece en la expresión de la ley de la gravitación de Newton. La relatividad general de Einstein, que relaciona la geometría del espacio-tiempo con la distribución local de materia-energía, conserva a esta constante en su ecuación principal. Sin embargo, de acuerdo a algunas teorías alternativas a la relatividad general, o bien algunas teorías que buscan lograr la (gran) unificación de las interacciones fundamentales, G sería variable, variando, por ejemplo, con la época cosmológica.

Newton (ley de la gravitación de): Es la fuerza atractiva que existe entre dos partículas masivas. Esta fuerza es proporcional a la magnitud de las masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa, donde la constante de proporcionalidad es la constante de Newton, G.

Nuclear fuerte (fuerza): La más fuerte de las cuatro interacciones fundamentales, responsable de mantener a los quarks confinados dentro de los neutrones y protones, y de mantener la integridad de núcleos con muchos neutrones y protones (cuando la repulsión eléctrica entre protones lo haría desmembrarse). Esta fuerza es de corto alcance y su distancia característica de acción es menor que 10^{-15} metros.

Nuclear débil (fuerza): Una de las cuatro interacciones fundamentales de la física, responsable, en particular, de mediar el decaimiento radiactivo de los núcleos. Al igual que la fuerza nuclear fuerte, la débil es de corto alcance.

Núcleo: Como en la biología, donde núcleo denota la parte central de una célula, aquí también núcleo indica la parte central de un objeto, aunque esta vez se trata de los átomos, y se compone de protones y neutrones. En el núcleo se concentra virtualmente la casi totalidad de la masa del átomo.

Nucleosíntesis: Formación (síntesis) de núcleos atómicos por medio de reacciones nucleares. De acuerdo con los modelos del Big Bang, la nucleosíntesis primordial habría ocurrido en los primeros tres minutos de la vida del universo, y se habrían generado en cantidades apreciables solo los núcleos más livianos (especialmente los núcleos del helio y del deuterio). Núcleos de elementos más pesados se crearán luego, en el interior de las estrellas, proceso que se denomina nucleosíntesis estelar. Finalmente, las explosiones de supernovas generarán las condiciones extremas necesarias para la formación de los núcleos más pesados de la tabla periódica.

Omega: Importante parámetro cosmológico definido como el cociente entre la densidad de materia-energía real del universo y la densidad crítica. Un valor de Omega mayor (menor) que 1 indica que la densidad de materia-energía real del universo es mayor (menor) que la crítica y, en consecuencia, que la geometría del espacio físico será esférica (hiperbólica) y de curvatura positiva (negativa). El valor critico Omega = 1 indica, en cambio, un universo euclídeo (de curvatura nula) de densidad idénticamente igual a la crítica. Las observaciones actuales indican que Omega es muy próximo a la unidad y que el universo es espacialmente plano.

Oscura (materia): Ver materia oscura.

Oscura (energía): Ver energía oscura.

Parsec (pc): Es una medida astronómica de distancia. Contracción de PARallax SECond. Se define como la distancia a la cual una unidad astronómica (1 UA) subtiende un ángulo de un segundo de arco (1''), esto es, 1 pc = 1 UA / 1''. En otras palabras, corresponde a la distancia a la que debemos alejarnos del sistema solar para que la distancia promedio Tierra-Sol (1 AU) se vea bajo un Ángulo de 1 segundo de arco. Tenemos 1 pc = 3,086 x 10^{18} cm = 3,26 años-luz. La estrella más cercana al Sol, Próxima Centauri, esta a 1,3 pc.

Partículas relativistas: Aquellas partículas cuyas velocidades características son próximas a

la velocidad de la luz. En el caso de partículas no masivas, como los fotones de la radiación electromagnética, la velocidad es exactamente la de la luz.

Perihelio: Es el punto más próximo al Sol en la órbita de un planeta o cometa. Para la Tierra el perihelio cae aproximadamente el 3 de enero.

Perihelio (avance del): De acuerdo con las leyes de Kepler y la mecánica newtoniana, las órbitas de los planetas alrededor del Sol son elipses fijas en el espacio. Sin embargo, las perturbaciones debidas a los demás planetas del sistema solar hacen que estas elipses "no se cierren" o, lo que es lo mismo, que estas elipses cambien lentamente sus posiciones en el mismo plano que las contiene. Esto resulta en una modificación de la posición del perihelio (más precisamente, en un avance del perihelio). La relatividad general de Einstein agrega una pequeña corrección al cálculo newtoniano que coincide exactamente con las discrepancias ya descubiertas a fines del siglo XIX entre las observaciones y la teoría newtoniana.

Perturbaciones cosmológicas: Pequeñas inhomogeneidades en la distribución de materia del universo que dieron origen –a través de la acción de la gravedad– a las grandes estructuras astrofísicas que nos rodean hoy. Uno de los más interesantes problemas de la cosmología actual es saber con precisión cómo fue que se originaron dichas perturbaciones. En la actualidad existe un gran consenso entre los cosmólogos en afirmar que estas "semillas primordiales" se habrían originado durante una etapa inflacionaria de nuestro universo que habría tenido lugar cuando este tenía no más de 10^{-35} de segundo de vida.

Planck (constante de): Parámetro fundamental de la mecánica cuántica, indicado con la letra "h". Es el parámetro que determina el tamaño característico de las unidades discretas de energía, espin, etc., en las cuales se fracciona el mundo subatómico.

Planck (tiempo de): Instante de tiempo en los modelos del Big Bang, anterior al cual la teoría general de la relatividad de Einstein se quiebra, y debe ser reemplazada por una teoría cuántica de la gravedad. En función de constantes fundamentales de la física, el tiempo de Planck puede expresarse como $[G\ h / (2\ \Pi\ c^5)]^{1/2}$, donde "G" es la constante de Newton, "c" es la velocidad de la luz y "h" es la constante de Planck, y vale aproximadamente 10^{-43} segundos.

Planck (longitud o escala de): La escala de longitud característica por debajo de la cual las fluctuaciones cuánticas en la "tela" espacio-temporal dejarían de ser despreciables. Es también la distancia que recorre un rayo de luz en un tiempo igual al tiempo de Planck.
Planetas extrasolares: Ver exoplanetas.

Planitud (problema de la): Un problema de los modelos del Big Bang relacionado con la precisión con que se debe ajustar el valor inicial del parámetro Omega, el cociente entre la densi-

dad real del universo y la densidad crítica. Omega varía su valor con el tiempo y, de no ser exactamente 1, se aparta rápidamente de este valor. Las observaciones actuales indican que Omega debe estar cerca de la unidad, y eso implica que su valor en épocas de la nucleosíntesis primordial (unos pocos minutos después de la singularidad) no podía diferir de 1 en más que una parte en 10^{15}. De no ser así, el universo que resultaría diferiría mucho del nuestro. Los modelos del Big Bang proveen el marco adecuado para que surjan este tipo de interrogantes, aunque no proveen la solución; esta solución quedará para modelos primordiales que complementen el Big Bang, como por ejemplo, los modelos inflacionarios.

Plano (espacio): Sinónimo de espacio Euclideo, donde las propiedades geométricas usuales deducidas de los postulados de Euclides tienen validez. En cosmología se refiere al espacio físico de tres dimensiones espaciales y sin curvatura.

Plano (universo): Universo de extensión infinita en el que el espacio está exento de curvatura. A un universo isótropo y homogéneo se lo llama plano si se encuentra justo en la línea divisoria que separa los universos llamados de baja densidad y los de alta densidad (estos últimos, a veces también llamados universos "cerrados)". Si la constante cosmológica es cero, un universo plano continuará su expansión indefinidamente, pero cada vez con menor velocidad (hasta detenerse "en el infinito", un balance exacto entre su energía cinética de movimiento y su energía potencial gravitatoria). En un universo plano, la densidad real de materia-energía es siempre igual a la llamada densidad crítica, y por ende el parámetro Omega es igual a la unidad.

Plasma: Un gas completamente ionizado, a veces llamado el cuarto estado de la materia (además de los estados sólido, líquido y gaseoso). En un plasma la temperatura es demasiado alta como para que existan átomos neutros, y la materia se separa en núcleos atómicos y electrones libres.

Polarización: Restricción en el modo de vibración de una onda transversal, como las ondas electromagnéticas. En estas ondas, los campos eléctrico y magnético son ortogonales entre sí y vibran en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La restricción que hace que, por ejemplo, el campo eléctrico sólo vibre en una dada dirección fija sobre este plano, y no en todas las posibles, resulta en un estado de polarización lineal. La polarización o cambio del estado de polarización de la luz se logra con polarizadores. La interacción de la radiación con partículas cargadas también polariza a la luz.

Positrón: La antipartícula del electrón.

Principio antrópico: Enunciado que afirma que el estado actual de nuestro universo puede explicarse por el hecho de que, de ser distinto, no existirían las condiciones adecuadas para la

vida y entonces no habría lugar para observadores (como nosotros) capaces de preocuparse sobre porqué el universo es como es. Por ejemplo, si la fuerza nuclear fuerte fuera apenas diferente de lo que es en la actualidad, la combustión termonuclear estelar sería distinta, las estrellas no brillarían como lo hacen en la realidad y la vida como la conocemos no tendría lugar. Se separan comúnmente dos definiciones en este principio. El principio antrópico "débil" y el "fuerte". El primero afirma que los valores observados de todas las cantidades físicas y cosmológicas, no son igualmente probables, sino que toman valores restringidos por el requerimiento que deben existir lugares en el cosmos donde la vida basada en la química del carbono pueda evolucionar, y por el requerimiento adicional que el universo sea lo suficientemente viejo como para haber permitido dicha evolución. Por otro lado, el principio antrópico "fuerte" afirma que el universo debe poseer aquellas propiedades que permitan la evolución de la vida en algún momento de su historia. Esta separación fue introducida por Brandon Carter en 1974.

Principio cosmológico (o copernicano): La hipótesis que afirma que nuestra ubicación espacial en el universo no debe ser privilegiada, que el universo debe resultar aproximadamente isótropo y homogéneo para todo posible observador.

Principio cosmológico perfecto: La extensión del principio cosmológico también al tiempo: el universo no sólo debe ser isótropo y homogéneo para todo posible observador, sino que además, debe mostrarse idéntico a sí mismo en todo instante de tiempo. Nótese que esto no prohíbe la expansión, aunque SI prohíbe un origen de los tiempos y un universo evolutivo. Este principio esta en la raíz del modelo del estado estacionario.

Protoestrellas: Densas concentraciones de gas y polvo en el seno de nubes moleculares frías que constituyen el estadio inicial de la constitución de las estrellas.

Protón: Partícula subatómica con carga eléctrica unidad que, junto con el neutrón, integra el núcleo de todos los átomos (es un nucleón). El número de protones de un núcleo atómico define al elemento: el hidrógeno tiene siempre sólo un protón como núcleo, el helio tiene siempre solo dos protones en su núcleo, etc., independientemente del número de neutrones que compartan ese núcleo (que no hacen más que cambiar el isotopo de dicho elemento).

Quark: Partículas fundamentales sobre las que actúa la fuerza nuclear fuerte. Los quarks existen en seis variedades (o "sabores"): up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t), bottom (b), y en tres "colores": rojo, verde y azul. Por ejemplo, tres quarks forman el proton (uud), pero deben ser los tres de colores distintos, de tal manera que estos, al neutralizarse, den un proton "sin color", como en efecto se verifica experimentalmente. El nombre quark está asociado con el numero "tres"; de acuerdo al físico Murray Gell-Mann, fue sacado de la novela Finnegans

Wake de James Joyce: "Three quarks for Muster Mark!..."

Quasar (o CUÁSAR): Los objetos extra galácticos más luminosos (y lejanos) del universo. Su nombre proviene de la contracción de Quasi Stellar Radio Sources (Q.S.R.S), acrónimo que en inglés suena como "quasars" y que significa fuentes (de radio) altamente energéticas de apariencia estelar. Se piensa que son poderosos núcleos de galaxias activas.

Quintaesencia: El quinto y más puro elemento en la filosofía antigua y medieval, que constituye la substancia de la cual están hechos los astros. En cosmología moderna, se da el nombre campos de quintaesencia a ciertas formas hipotéticas de energía oscura que podrían dar cuenta de las observaciones actuales que indican un movimiento de expansión acelerada para nuestro universo. A diferencia de la constante cosmológica de Einstein (otra forma de energía oscura), los campos de quintaesencia no permanecerían constantes en el tiempo, pudiendo incluso tener fluctuaciones cuánticas, que harían su dinámica menos trivial y más fácilmente amoldable a las estrictas y variadas observaciones astrofísicas actuales.

Radiación cósmica de fondo: In extenso, radiación cósmica del fondo de microondas. Es un fondo difuso de radiación de muy alto nivel de isotropía, cuya distribución de intensidad en función de la frecuencia corresponde al llamado espectro de cuerpo negro, y sigue con extrema precisión una curva teórica conocida como la curva de Plank. Vestigio del Big Bang, es un frío baño de radiación en la región de las ondas radio y que hoy cuenta con unos pocos grados Celsius por encima del cero absoluto (2,725 K, para ser más precisos). Llega de todas las direcciones del universo y llena completamente el espacio intersideral. La ley de Planck de su espectro es un fuerte indicio de la existencia, miles de millones de años atrás, de un estado de equilibrio térmico total entre todos los constituyentes del universo (partículas elementales, corpúsculos de radiación, etc.); equilibrio que se habría roto en un determinado momento (llamado "desacoplamiento") y que habría dejado "escapar" este fondo de radiación. La presencia de este fondo es una característica distintiva de los modelos con un comienzo "caliente" y energético, como los del Big Bang. Fue descubierta en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson, que recibieron el premio Nobel de Física de 1978 por ello.

Rayos cósmicos: Son partículas subatómicas (protones, neutrones y núcleos atómicos despojados de sus electrones) que ingresan en la atmósfera terrestre desde el espacio. Se los detecta en un rango muy amplio de energías, que llegan hasta 10^{20} eV. Un protón con esa energía se mueve a velocidad muy cercana a la de la luz, y a pesar de su minúscula masa su energía es equivalente a la de una pelota de tenis impulsada a 150 km/hora.

Rayos gamma: Son una forma de radiación electromagnética de onda muy corta y muy alta frecuencia (por encima de 10^{19}Hz). Fueron descubiertos en 1900 por el fisicoquímico francés Paul Villard (1860-1934) estudiando la radioactividad natural del uranio.

Recombinación: Proceso de captura de un electrón por un ion positivo que, en los modelos del Big Bang, toma lugar principalmente cuando un protón captura un electrón para formar un átomo de hidrógeno. Esta "recombinación" del hidrógeno neutro ocurre cuando el universo tenía una temperatura aproximada de unos 4.000 kelvin, y entre unos 100 mil y unos 400 mil años de vida. Sucede poco antes de la época del desacoplamiento pues, dado que la proporción de materia ionizada disminuye bruscamente durante la recombinación, la radiación, que interactúa muy poco con la materia neutra, se desacoplará luego de ésta.

Reionización: Luego de la formación de la materia neutra (durante la etapa de la recombinación del hidrógeno) el universo es en gran medida transparente a la radiación cósmica de fondo. Pero a los pocos cientos de millones de años, las primeras estrellas y quasares comienzan a formarse. Estas potentes fuentes de radiación, que emiten en longitudes de onda cercanas al ultravioleta, terminarán por volver a ionizar a la materia neutra, dando lugar a un nuevo periodo en el que el universo se hallara ionizado; por eso se habla de "reionización". Se considera comúnmente que la observación de dicho periodo de reionización es un fuerte indicio del momento aproximado en el que se generaron las primeras estrellas, época en la que las "tinieblas cósmicas" llegan a su fin.

Relatividad especial: Descripción de los fenómenos mecánicos y electromagnéticos que involucran fuentes y observadores desplazándose a velocidades próximas a la de la luz, pero en ausencia absoluta de efectos gravitatorios. Fue propuesta por Einstein en 1905, aunque varios otros científicos contemporáneos, tanto experimentales como teóricos, también contribuyeron a delinear sus bases.

Relatividad general: Descripción de la gravedad propuesta por Einstein en 1916 en la cual la curvatura del espacio-tiempo tetradimensional surge de la distribución local de materia-energía, y, a su vez, el movimiento de la materia es afectado por la curvatura del espacio-tiempo, todo esto en una forma bien precisa, dictada por las ecuaciones del campo gravitatorio. La relatividad general (generalización de la relatividad especial) es la teoría que describe aquellos fenómenos mecánicos, gravitatorios y electromagnéticos que toman lugar en presencia de campos gravitatorios fuertes y que involucran velocidades próximas a (o al menos, no mucho menores que) la de la luz. Estos últimos son los casos donde la teoría de Einstein se aparta notoriamente de la gravitación de Newton y son ejemplos típicos el estudio de objetos compactos, como los agujeros negros, y el estudio del universo.

Remanentes de supernovas: Estructuras que se forman en el espacio como consecuencia de las explosiones de supernovas, y está compuesto por el material expelido por la estrella explotada, más el material que la onda expansiva encuentra en su camino y, eventualmente, una estrella de neutrones en su interior.

Retrógrado (movimiento): Movimiento aparente de un planeta en dirección opuesta a la normal, producido por el movimiento orbital de la Tierra; en astronomía, este movimiento retrógrado corresponde a moverse –noche tras noche– de Este a Oeste.

Segundo de arco: Unidad angular usada en astronomía. Un segundo de arco (notado 1'') equivale a 1/3.600 de un grado.

Segundo-luz: La distancia recorrida en el vacío por un haz de luz en un segundo, esto es, aproximadamente unos 300.000 kilómetros.

Singularidad: Región del espacio-tiempo donde las leyes conocidas de la física se quiebran, donde la "tela" espacio-temporal sufre una ruptura y la curvatura se hace infinita. Hoy se piensa que los modelos del Big Bang comienzan con una tal singularidad.

Sirio (Alpha Canis Majoris): Ubicada en la constelación del Can Mayor, es llamada la Estrella Canicular, o a veces el Perro de Orion. Es la estrella de mayor brillo (aparente) del cielo, con una luminosidad aparente unas 26 veces menor que la del Sol. Se ubica a 8,7 años-luz de la Tierra y tiene una estrella compañera (una débil enana blanca, y que orbita alrededor de la estrella principal) llamada Sirio B.

Sol: Estrella del sistema solar, alrededor de la cual orbita la Tierra y los demás planetas y cometas. Su edad se estima en unos 4.600 millones de años, y se halla a unos 27.000 años-luz del centro de la galaxia, o sea a un 40% de la distancia entre el centro y el borde del disco galáctico.

Supercuerdas (teoría de): Teoría de cuerdas que incorpora una simetría adicional, llamada la supersimetría. Esta última postula un principio de simetría que relaciona partículas con distintas cantidades de espin, llamadas bosones (espin entero: -1, 0, 1, etc.) y fermiones (espin semi-entero: -3/2, -1/2, 1/2, 3/2, etc.).

Supercúmulo galáctico: Un cúmulo de cúmulos de galaxias, típicamente de un tamaño que ronda los 100 millones de años-luz.

Supernova (SN): Violenta explosión que marca el fin de la vida de algunas estrellas. Dicho final también puede deberse a la acumulación de un exceso de materia de una estrella vecina, y puede dejar como remanente un objeto compacto del tipo de una estrella de neutrones (incluso un agujero negro, si la masa es suficientemente grande). Existen varios tipos de eventos de supernova, clasificados principalmente por los elementos presentes en sus espectros de luz (las SN de tipo I no muestran hidrógeno en sus espectros; las de tipo II en cambio SI lo muestran). Las SN de tipo I se clasifican además en SN-Ia, SN-Ib y SN-Ic. Las dos últimas re-

sultan del colapso de estrella masivas que han perdido sus atmósferas de hidrógeno; las primeras son estrellas del tipo de las enanas blancas, que al incorporar demasiada masa de otra estrella compañera cercana, colapsan gravitacionalmente, terminando su vida en una gigantesca explosión termonuclear. Recientemente, las SN-Ia han sido muy usadas en cosmología como patrones de luminosidad para calcular distancias astronómicas.

Teoría del Big Bang: Es un conjunto de modelos cosmológicos que dan cuenta del estado ultra temprano y posterior desarrollo del universo que concuerdan en un alto grado de precisión con las evidencias observadas. El término Big Bang o gran explosión (una mala designación para la teoría, pues no existe una tal "gran explosión") alude a que el universo se habría expandido en un tiempo limitado a partir de un estado inicial de altísima temperatura y presión, y continúa expandiéndose hoy.

Tritio: Isótopo del hidrógeno de corta vida-media (unos 12 años) en el cual el núcleo esta formado por un protón y dos neutrones. Es el isótopo más pesado del hidrógeno y no se encuentra en forma natural en la Tierra.

Unidad astronómica (UA): Es una medida astronómica de distancia, equivalente a la distancia promedio entre la Tierra y el Sol, es decir, unos 150 millones de kilómetros (más exactamente $1{,}496 \times 10^{13}$ centímetros, o 8,31 minutos-luz). Para distancias de órdenes de magnitud mucho mayores se usan el año luz o el parsec.

Universo estático (de Einstein): Modelo cosmológico en el cual el universo se mantiene estático (sin expansión ni contracción) gracias a la introducción de una fuerza cosmológica "repulsiva" (relacionada con la llamada constante cosmológica de Einstein) que contrarresta, en forma precisa, la atracción gravitatoria de la materia-energía ordinaria.

Velocidad radial de las estrellas: Es la componente radial (o sea, en dirección al observador) de la velocidad relativa de cada estrella con relación al Sol. Se debe a que cada estrella posee una velocidad diferente en su movimiento alrededor del centro de la galaxia.

WIMP: Acrónimo inglés, viene de Weakly Interacting Massive Particle, o sea, partícula masiva débilmente interactuante. Se usa como término genérico para designar una clase de partículas hipotéticas que brindarían una forma de materia oscura, posiblemente materia oscura no bariónica.

Bibliografía

- **AA.VV.**, "Año Internacional de la Astronomía", Ciencia Hoy, Vol 19, Nro 110, abril-mayo, 2009 (número temático), A.Gangui, editor reponsable.

- **Bruno, Giordano**, Sobre el infinito universo y los mundos, Editorial Aguilar, Buenos Aires, 1981.

- **Copérnico, Nicolás**, Sobre las revoluciones (De revolutionibus orbium coelestium livri vi), Ediciones Altaya, 1997.

- **de Rath, Valérie,** Georges Lemaître, le Père du big bang, Editions Labor, 1994.

- **Gangui, Alejandro**, El Big Bang: La génesis de nuestra cosmología actual, Eudeba, Buenos Aires, 2005. 400 pág., ISBN 950-23-1386-0.

- **Gangui, Alejandro** (ed.), El universo de Einstein: 1905-annus mirabilis-2005, Eudeba, Buenos Aires, 2007. 536 pág., ISBN 978-950-23-1578-2.

- **Gangui, Alejandro**, A Preposterous Universe, Science 299, 1333-1334 (2003).

- **Gangui, Alejandro**, La Polarización de la Radiación Cósmica de Fondo, Ciencia Hoy, Nro 74, pag. 56-61, abril-mayo, 2003.

- **Gangui, Alejandro**, In Support of Inflation, Science 291, 837-838 (2001).

- **Gangui, Alejandro**, Superconducting Cosmic Strings, American Scientist, Vol 88, No 2, pages 254-263, May-June issue (2000).

■ **Gangui, Alejandro y Peter, Patrick**, 1999, Cuerdas cósmicas conductoras, Investigación y ciencia, 274:74-83, julio.

■ **Guth, Alan**, The Inflationary Universe, Jonathan Cape editors, London, 1997.

■ **Higgs, P. W.**, 1964, 'Broken symmetries and the masses of gauge bosons', Physical Review Letters, 13:508-509. Accesible en http://prola.aps.org/abstract/PRL/v13/i16/p508_1

■ **Hoyle, Fred, Burbidge, Geoffrey, y Narlikar, Jayant V.**, A Different Approach to Cosmology: From a Static Universe through the Big Bang towards Reality, Cambridge University Press, 2000.

■ **Kragh, Helge**, Cosmology and Controversy, Princeton University Press, 1996.

■ **Lemaître, Georges**, L'Hypothèse de l'Atome Primitif, Editions du Griffon, 1946.

■ **Newton, Isaac**, Principios matemáticos de la filosofía natural (Philosophiae Naturalis Principia Mathematica, Londres 1687), Editora Nacional, Madrid 1982.

■ **Partridge, R.**, 3K, The Cosmic Microwave Background Radiation, Cambridge University Press, 1995.

■ **Peter, Patrick y Gangui, Alejandro**, Des Défauts dans l'Univers: Cordes cosmiques et autres trous de l'espace-temps, CNRS Editions, Paris 2003. 192 pág., ISBN 2-271-06155-5.

■ **Reines, Frederick** (ed.), Cosmology, Fusion and other Matters: George Gamow Memorial Volume. Boulder, CO: Associated University Press, 1972.

■ **Smoot, George, y Davidson, Keay**, Wrinkles in Time, Avon Books, 1994.

■ **Weinberg, Steven**, Los tres primeros minutos del universo, Alianza 1997.